



**HAL**  
open science

# Altération d'habitat hydraulique liée à la gestion des débits, des prélèvements et du changement climatique dans le bassin du Rhône

Nans Guichonnet

► **To cite this version:**

Nans Guichonnet. Altération d'habitat hydraulique liée à la gestion des débits, des prélèvements et du changement climatique dans le bassin du Rhône. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2018. dumas-03544174

**HAL Id: dumas-03544174**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03544174v1>**

Submitted on 26 Jan 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Institut national de recherche en  
sciences et technologies pour  
l'environnement et l'agriculture



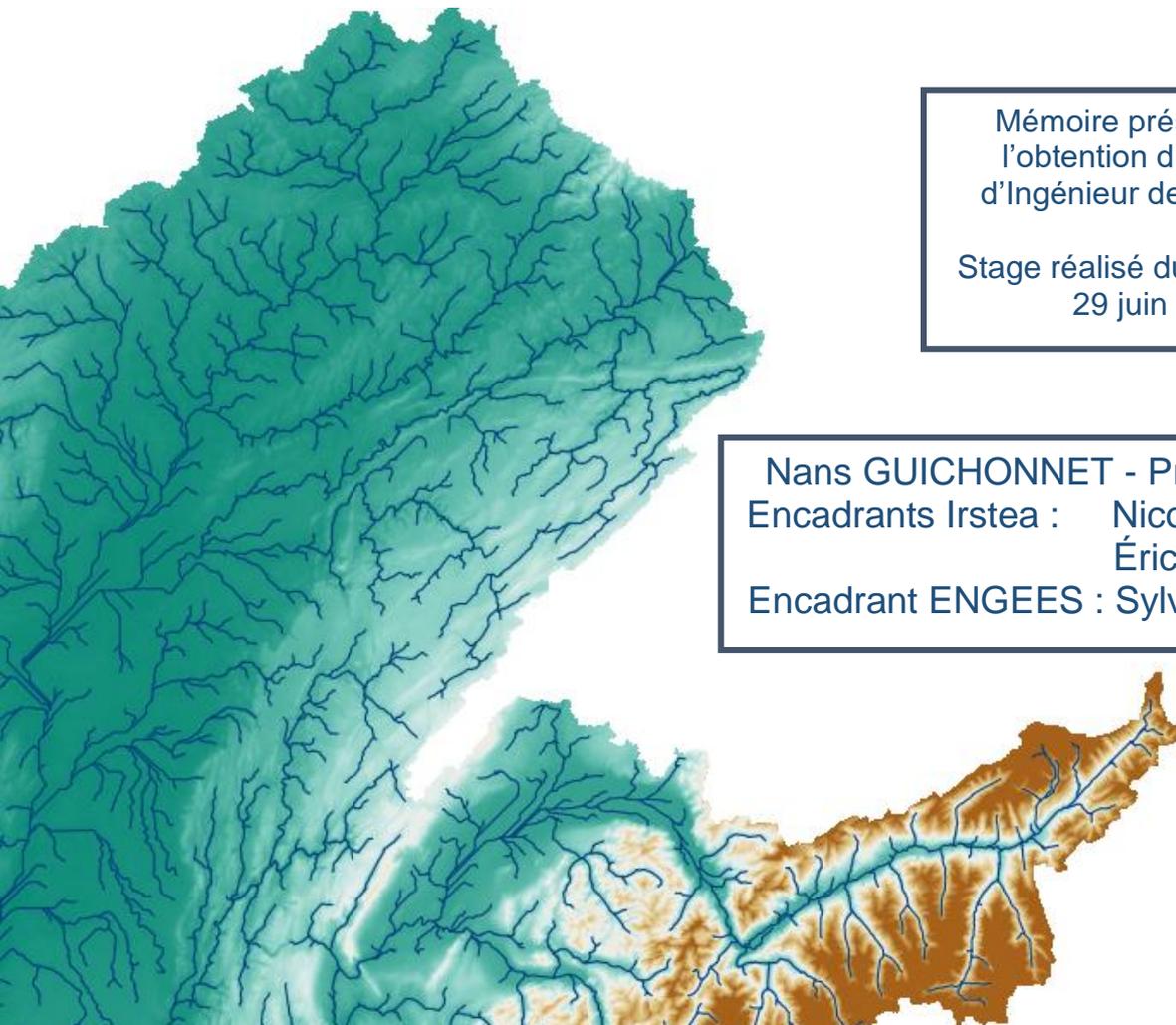
ÉCOLE NATIONALE DU GÉNIE DE L'EAU  
ET DE L'ENVIRONNEMENT DE STRASBOURG

## Altération d'habitat hydraulique liée à la gestion des débits, des prélèvements et du changement climatique dans le bassin du Rhône

Mémoire présenté pour  
l'obtention du Diplôme  
d'Ingénieur de l'ENGEES

Stage réalisé du 3 janvier au  
29 juin 2018

Nans GUICHONNET - Promotion Freiburg  
Encadrants Irstea : Nicolas LAMOUREUX  
Éric SAUQUET  
Encadrant ENGEES : Sylvain PAYRAUDEAU





## Résumé

### **Altération d'habitat hydraulique liée à la gestion des débits, des prélèvements et du changement climatique dans le bassin du Rhône**

Les prévisions concernant le réchauffement climatique ainsi que l'occurrence d'évènements marquants par leur intensité (étiages de 2003 et 2011) ont accentué les problématiques de gestion de la ressource en eau (irrigation des parcelles agricoles, débits réservés et retenues d'eau, maintien de l'écosystème) et ont entraîné l'émergence de nouvelles législations (circulaires du 30 Juin 2008 et du 3 Août 2010, conférence environnementale de Septembre 2013).

Ces nouvelles législations visent à obtenir des estimations précises des flux de la ressource en eau et également à déterminer l'impact de ces flux sur les écosystèmes aquatiques, notamment les populations piscicoles.

Cette étude a pour but d'appréhender l'impact de l'anthropisation du bassin du Rhône ainsi que du changement climatique sur les populations piscicoles.

L'anthropisation sera représentée par la modélisation de grands ouvrages de régulation et de l'irrigation, le changement climatique par la modélisation de deux scénarios extrêmes, un optimiste et un pessimiste.

Ces perturbations peuvent en effet impacter les populations piscicoles par la dégradation de grandeurs hydrologiques comme le débit.

Dans le but d'appréhender l'impact de telles altérations hydrologiques sur ces populations piscicoles, plusieurs types d'approches existent et sont à combiner.

Les méthodes « hydrologiques » quantifient l'altération, par rapport à une situation naturelle (sans ouvrages de régulation ni irrigation), de plusieurs statistiques de débit déterminantes d'un point de vue écologique (étiages, crues ...).

Les méthodes « hydrauliques » étudient le lien entre les altérations de débits et l'évolution de grandeurs hydrauliques (hauteur d'eau, périmètre mouillé ...) et permettent ainsi de prendre en compte la morphologie des cours d'eau.

Enfin, les méthodes dites « d'habitat » créent un lien entre des modèles hydrauliques et des modèles de préférence, prenant en compte les exigences des différentes espèces.

Jusqu'à récemment, les modèles d'habitat ont surtout concerné l'échelle du tronçon pour des raisons de coûts et de complexité.

La réalisation de telles études à une large échelle est désormais possible grâce à la simplification des modèles d'habitat directement liés aux caractéristiques hydrauliques moyennes des cours d'eau (Lamouroux, 2002).

Mots clés : Habitat hydraulique, modélisation, large échelle

## Abstract

### **Hydraulic habitat alteration related to flow regulation, abstraction and climate change in Rhône catchment**

Forecasts about global warming and occurrence of important events (low flows in 2003 and 2011) have amplified issues about water management (agricultural plots irrigation, instream flows, water storage, ecosystem conservation) and have triggered new regulations (30<sup>th</sup> June 2008 and 3<sup>rd</sup> August 2010 circulars, September 2013 Environmental Conference). Those new regulations aim to obtain flow precise estimations and to figure out the impact of those flows on aquatic ecosystem, in particular fishes.

The purpose of this study is to estimate the impact of those human activities and the impact of climate change on Rhône catchment.

Human activities will be estimated by the modelling of important flow regulation structures and agricultural irrigation as for climate change that will be modeled by two extreme scenarios. Indeed, such disturbances may have an impact on fish populations, degrading hydrologic characteristics like flows.

To estimate the impact of those hydrologic perturbations on fish populations, several approaches exist and have to be combined.

“Hydrologic” methods quantify the alteration, compared to a naturalized situation (without regulation structures and irrigation), of several crucial flow characteristics on ecologic aspects (low flows, floods).

“Hydraulic” methods describe the link between hydrologic alterations and hydraulic characteristics (water level, wetted perimeter) evolution. This way, those methods allow to consider stream morphology.

Finally, “habitat” methods create a connection between hydraulic information and preference models which take into account requirements of fish species.

Until recently, habitat models especially concerned local scales like stream sections because of cost and complexity.

Such studies are now conceivable on large scales like entire catchment thanks to the simplification of the habitat models directly attached to mean hydraulic characteristics of streams.

Key words: Hydraulic habitat, modelling, large scale

## Table des matières

Résumé.....	2
Abstract.....	3
Symboles, sigles et abréviations .....	7
Glossaire.....	7
Remerciements .....	8
Contexte général de l'étude.....	9
1.    Le centre Irstea Lyon – Villeurbanne.....	9
2.    Objectifs de l'étude .....	9
Matériel et méthodes.....	13
1.    Présentation de la zone d'étude.....	13
2.    Présentation des outils.....	14
a.    Le modèle hydrologique J2000.....	14
b.    La modélisation statistique des habitats (outils ESTIMHAB, ESTIMKART) ..	15
3.    Traitement des débits : utilisation du modèle J2000.....	18
4.    Choix du réseau hydrographique .....	19
a.    Présentation du réseau hydrographique théorique et choix du réseau d'étude	19
b.    Correspondance J2000-RHT .....	22
c.    Synthèse du réseau hydrographique finalement utilisé .....	23
d.    Vérification des débits et des probabilités de présence d'espèces.....	24
e.    Carte des débits et de probabilité de présence d'espèce .....	26
Résultats et discussion.....	28
1.    Présentation des scénarios.....	28
1.    Impact de l'anthropisation – Période actuelle (1985-2012).....	31
2.    Impact pur du changement climatique (2075-2100) .....	36
3.    Impact de l'anthropisation – Période future (2075-2100).....	40
4.    Incertitudes .....	44
Conclusion .....	47
Annexes .....	48
Bibliographie .....	64

## Table des figures

Figure 1: Irstea en France .....	9
Figure 2: Exemple de relation empirique "Débits-Ecologie" (d'après Webb et al., 2015).....	9
Figure 3: Méthodologie générale .....	11
Figure 4: Zones piscicoles de Huet.....	12
Figure 5: Carte du bassin du Rhône et localisation des grands ouvrages de régulation .....	13
Figure 6: Composantes des unités de réponses hydrologiques.....	14
Figure 7: Principe du modèle d'habitat (Miguel et al., 2016) .....	17
Figure 8 : Débits journaliers (m <sup>3</sup> /s) : Exemple de l'arc 4752:.....	18
Figure 9: Réseau hydrographique théorique (Pella et al. 2012) .....	19
Figure 10: Superposition des arcs modélisés sur le RHT (en rouge) et le modèle J2000 (en bleu) .....	21
Figure 11: Correspondance J2000/RHT .....	22
Figure 12: Synthèse de l'adaptation du réseau hydrographique et du nombre d'arcs étudiés .....	23
Figure 13: Comparaison des modules J2000/RHT du réseau hydrographique final.....	24
Figure 14: Comparaison des probabilités de présence de la truite selon les débits de J2000 et ceux du RHT .....	25
Figure 15: Comparaison des probabilités de présence du barbeau selon les débits de J2000 et ceux du RHT .....	25
Figure 16: Carte des débits (l/s/km <sup>2</sup> ) sur le bassin du Rhône naturel (sans irrigation ni ouvrages de régulation).....	26
Figure 17 : Carte des probabilités de présence de la truite et du barbeau .....	27
Figure 18: Forçage radiatif estimé pour les différents scénarios de référence (Source : DRIAS) .....	29
Figure 19: Découpage du bassin du Rhône en sous-bassins DCE administratifs (2016).....	30
Figure 20: Modifications hydrologiques (%) du scénario anthropisé (irrigation et ouvrages de gestion de débits) comparé au scénario naturel (sans anthropisation) pour les moyennes interannuelles (modules), Q50, Q95 et VCN15 sur l'ensemble du bassin d'étude.....	32
Figure 21: Modifications d'habitat (en %) liées à l'anthropisation du bassin pour les espèces de la truite et du barbeau.....	33
Figure 22: Carte des altérations hydrologiques supérieures à 30% liées à l'anthropisation du bassin, identification des cours d'eau et des ouvrages de la Durance, de l'Isère et de la Drac .....	35
Figure 23: Modifications du VCN15 liées au changement climatique pour les scénarios 2.6 et 8.5 sur le bassin du Rhône naturalisé.....	36
Figure 24: A: Ecart brut de température (°C) pour le scénario 8.5 - B: Modifications du VCN15 (%) - C: Modifications de la SPU de la truite (%) et de la nouvelle distribution - D: Modifications de la SPU du barbeau (%) et de la nouvelle distribution .....	37
Figure 25: Modifications du VCN15 liées à l'anthropisation du bassin pour les scénarios 2.6 et 8.5 .....	40
Figure 26: A: Modifications du VCN15 (%) liées à l'anthropisation du bassin dans le futur (scénario 8.5) - B: Modifications de la SPU de la truite (%) et de la nouvelle distribution- C: Modifications de la SPU du barbeau (%) et de la nouvelle distribution .....	41
Figure 27: Illustration de l'habitat physique quotidien (d'après Thévenet, 1998) .....	44
Figure 28: Exemple d'incertitudes à l'échelle du tronçon .....	45

## Table des tableaux

Tableau 1: Attributs environnementaux calculés (Pella et al. 2012) .....	20
Tableau 2: Arcs modélisés sur le bassin du Rhône .....	20
Tableau 3: Tableau récapitulatif des différents scénarios étudiés et de leur contexte de référence associé .....	29
Tableau 4: Tableau récapitulatif de l'impact de l'anthropisation du bassin - Période actuelle	34
Tableau 5: Tableau récapitulatif des altérations hydrologiques et d'habitat sur l'ensemble du bassin du Rhône concernant l'impact du changement climatique (scénario 8.5) .....	38
Tableau 6: Tableau récapitulatif des nouvelles distributions de la truite et du barbeau liées au changement climatique (scénario 8.5) .....	39
Tableau 7 : Tableau récapitulatif des altérations hydrologiques et d'habitat sur l'ensemble du bassin du Rhône concernant l'impact de l'anthropisation (ouvrages de régulation et irrigation) pour le scénario 8.5 .....	42
Tableau 8: Comparaison de la proportion des cours d'eau (en % de longueur) subissant d'importantes altérations hydrologiques liées à l'anthropisation du bassin Période actuelle / Scénario 8.5 .....	42
Tableau 9: Tableau récapitulatif des nouvelles distributions de la truite et du barbeau liées à l'anthropisation du bassin (scénario 8.5) .....	43

## Tableau des annexes

Annexe 1: Interface de JAMS .....	48
Annexe 2: Détermination des coefficients de géométrie hydraulique .....	49
Annexe 3: Valeurs des coefficients des différentes espèces intervenant dans le calcul de la probabilité de présence .....	50
Annexe 4: Etude des incertitudes des paramètres environnementaux du RHT (Pella et al., 2012) .....	51
Annexe 5: Vérifications des débits du RHT par apport aux stations hydrométriques (Pella et al., 2012) .....	51
Annexe 6: Choix initial d'utiliser le réseau J2000 .....	52
Annexe 7: Réalisation des couches nécessaires à l'approche ESTIMKART : Mailles SAFRAN, sous-bassins versants et ordre de Strahler du réseau J2000 .....	53
Annexe 8: Etude préalable des attributs environnementaux du réseau J2000 sur une partie du sous bassin versant de la Saône .....	55
Annexe 9: Exemple d'affectation aux stations hydrométriques .....	55
Annexe 10: Evaluation de la correspondance en termes de surface de bassin versant amont .....	56
Annexe 11: Correspondance J2000/RHT en termes de débits .....	58
Annexe 12: Localisation des ouvrages de régulation du débit modélisés dans J2000 .....	59
Annexe 13: Principe de la modélisation de l'irrigation dans J2000 .....	60
Annexe 14: Ecart brut des cumuls de pluie interannuelle moyenne (2075-2100) .....	61
Annexe 15: Ecart brut de température interannuelle moyenne (2075-2100) .....	61
Annexe 16: A : Ecart brut de température pour le scénario 2.6 (2100) - B : Modifications du VCN15 (%) - C : Modifications de la SPU de la truite (%) et de la nouvelle distribution (%) - D : Modifications de la SPU du barbeau (%) et de la nouvelle distribution .....	62
Annexe 17: A: Modifications du VCN15 (%) liées à l'anthropisation du bassin dans le futur (scénario 2.6) - B: Modifications de la SPU de la truite (%) et de la nouvelle distribution- C: Modifications de la SPU du barbeau (%) et de la nouvelle distribution .....	63

## Symboles, sigles et abréviations

**MDR** : Modélisation hydrologique distribuée du Rhône

**RHT** : Réseau Hydrographique théorique

**Irstea** : Institut de recherche en sciences et technologies de l'environnement et de l'agriculture

**EPST** : Etablissement public à caractère scientifique et technologique

**HRU** : Unité de réponse hydrologique

**SPU** : Surface pondérée utile

## Glossaire

**Bassin versant** : Aire géographique drainée par une rivière en un point appelé exutoire

**Arc** : tracé du réseau hydrographique, sous la forme d'une polyligne, unique entre deux confluences

**Q95** : Correspond au débit classé, dépassé 95% du temps

**Q50** : Correspond au débit classé, dépassé 50% du temps

**Moyenne interannuelle** : Le débit annuel interannuel est la moyenne des débits annuels sur une période d'observations suffisamment longue pour être représentative des débits mesurés ou reconstitués. Il est fréquemment dénommé module interannuel ou module. Il permet de caractériser l'écoulement d'une année " moyenne " (Banque hydro)

**Tronçon** : Longueur de cours d'eau comportant plusieurs faciès d'écoulement (radier, mouille).

## Remerciements

Tout d'abord je souhaite remercier Nicolas Lamouroux et Éric Sauquet, mes deux encadrants, de m'avoir permis de réaliser ce stage au sein d'Irstea. Leur accueil, leur aide et leur disponibilité ont été une aide indispensable à la réalisation de cette étude et ont fait de ces six mois une période extrêmement riche en apprentissage.

Je tiens également à remercier mes autres encadrants, Isabelle Braud, Flora Branger, Sophie Cauvy-Fraunie, Hervé Pella et Hervé Capra pour leur aide, leurs explications et leur soutien tout au long de ce stage.

Merci finalement à l'ensemble de l'équipe Dynam sans qui ce stage n'aurait pas été le même. Je tiens à les remercier chaleureusement pour leur accueil et leur bonne humeur durant ces 6 mois. Un merci tout particulier à Raphaël Mons m'ayant permis de réaliser des sorties terrain et de me partager son expérience.

# Contexte général de l'étude

## 1. Le centre Irstea Lyon – Villeurbanne

Irstea (Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture), est un établissement public à caractère scientifique et technologique (EPST).

Il existe 9 centres en France (Figure 1) ainsi qu'une implantation hors centre (Strasbourg). Mobilisant plus d'un millier de chercheurs, ingénieurs, doctorants et post-doctorants.

Le centre de Lyon-Villeurbanne regroupe plusieurs domaines d'activité (Ecologie, Chimie) pour la gestion des risques environnementaux et la restauration des milieux).

L'unité de recherche RIVERLY est composée de 9 équipes scientifiques, dont l'équipe Dynam (Dynamiques et modèles en écohydrologie), où s'est déroulé ce stage en co-encadrement avec l'équipe hydrologie des bassins versants.



Figure 1: Irstea en France  
Source : Irstea

## 2. Objectifs de l'étude

Les débits écologiques peuvent être définis comme la quantité, saisonnalité et qualité des débits nécessaires à la durabilité des écosystèmes d'eau douce et estuariens ainsi qu'aux besoins et au bien-être des hommes qui dépendent de ces écosystèmes. (Déclaration de Brisbane au 10th International River symposium and International Environmental Flows Conference à Brisbane, Australie).

Deux approches sont couramment utilisées pour définir de tels débits.

La première approche est dite « hydrologique » et a pour but de traduire des altérations hydrologiques (par rapport à une situation naturelle ou naturalisée) en altérations biologiques. (Figure 2).

Les premières approches hydrologiques (Tennant, 1976) utilisaient uniquement quelques grandeurs hydrologiques très affectées par les usages, comme le débit minimum à maintenir à l'aval des ouvrages. Aujourd'hui, d'autres grandeurs sont utilisées, relatives aux étiages, aux crues, aux variations de débits et aux événements pour un examen plus complet des différentes composantes du régime hydrologique.

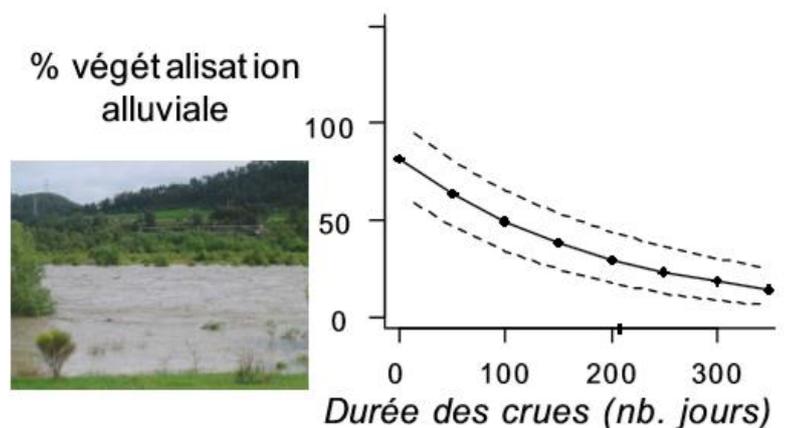


Figure 2: Exemple de relation empirique "Débits-Ecologie" (d'après Webb et al., 2015)

Le lien entre des altérations de caractéristiques hydrologiques (réduction de débits d'étiage ou de crue de plusieurs dizaines de %) et des altérations écologiques ne peut être nié (Poff et Zimmerman, 2010). Cependant, l'établissement de lois générales s'avère très compliqué à mettre en œuvre. En effet, les caractéristiques hydrauliques n'ont pas nécessairement la même importance dans un contexte donné (Jowett & Biggs, 2006), les caractéristiques écologiques pouvant également dépendre d'une grande variété d'autres paramètres comme la morphologie du cours d'eau.

La seule utilisation de ce type d'approche dite « hydrologique » apparaît alors limitée, un même débit pouvant être associé à des caractéristiques hydrauliques très différentes en fonction du cours d'eau.

La seconde approche est dite « approche habitat hydraulique ». Elle permet de traduire certaines modifications hydrologiques en modifications hydrauliques (vitesses, hauteurs d'eau) et enfin en modifications de la qualité de l'habitat. Cette approche repose sur l'observation de préférences d'habitat hydraulique pour les organismes aquatiques, dépendant de l'espèce, de son activité et également de son stade de développement.

L'étude des poissons est couramment favorisée car elle présente plusieurs avantages (Oberdorff et al., 2001). En effet, les poissons sont présents dans une très grande diversité de profils hydrauliques (milieux lenticules, lotiques). De plus, leur biologie apparaît mieux connue que celles d'autres organismes aquatiques et ils occupent plusieurs niveaux trophiques. Enfin, ils ont également une importance culturelle et économique importante, facilitant leur protection par une prise de conscience des différents acteurs.

La détermination des débits écologiques peut se faire à deux échelles. La première échelle est celle du tronçon de cours d'eau. Cette échelle est surtout liée à des études d'impacts d'ouvrages et de prises d'eau comme l'établissement des débits réservés à l'aval d'ouvrages (article L214-18 du Code de l'Environnement et circulaires associées ; République Française, 2011). (Pragana et al., 2017)

La deuxième échelle est celle du bassin versant dans son intégralité. Cette échelle prend aujourd'hui une importance grandissante due à l'émergence de nouvelles réglementations (European Commission, 2015).

De nombreux modèles d'habitat hydraulique existent (Dunbar et al., 2012), cependant, leur utilisation est liée à l'échelle d'étude.

L'utilisation de modèles numériques nécessite l'utilisation de données environnementales (comme la topographie du lit du cours d'eau) très précises dans le but de résoudre les équations de conservation de la masse et de l'énergie.

Une alternative aux modèles numériques est la modélisation statistique. Cette dernière repose sur des estimations statistiques des distributions de variables hydrauliques ponctuelles dans les tronçons de cours d'eau. Les modèles statistiques sont plus faciles à mettre en œuvre et ne nécessitent que des caractéristiques moyennes liées au tronçon (largeur, hauteur, granulométrie, etc.). Un réseau hydrographique peut alors être suffisant comme support de modélisation. Ce type de modèle apparaît alors très attractif à grande échelle par sa facilité de mise en œuvre.

La définition et la description des usages et des pressions subies par la ressource en eau sont finalement très importantes, le but étant d'étudier l'impact des modifications à partir d'une situation naturelle ou naturalisée.

L'étude présentée dans ce rapport vise à étudier l'impact sur les populations de poissons de grands ouvrages de régulation du débit disposant de grands réservoirs ainsi que de l'irrigation liée à l'agriculture à l'échelle du bassin du Rhône. Deux scénarios extrêmes du

changement climatiques pour la fin du XXI<sup>e</sup> siècle seront également simulés (impact pur du changement climatique et impact des ouvrages de régulation de débit et de l'irrigation dans le futur)

Cette étude se fera par l'intermédiaire de l'utilisation successive de plusieurs modèles. La figure 3 synthétise les grandes étapes de l'étude.

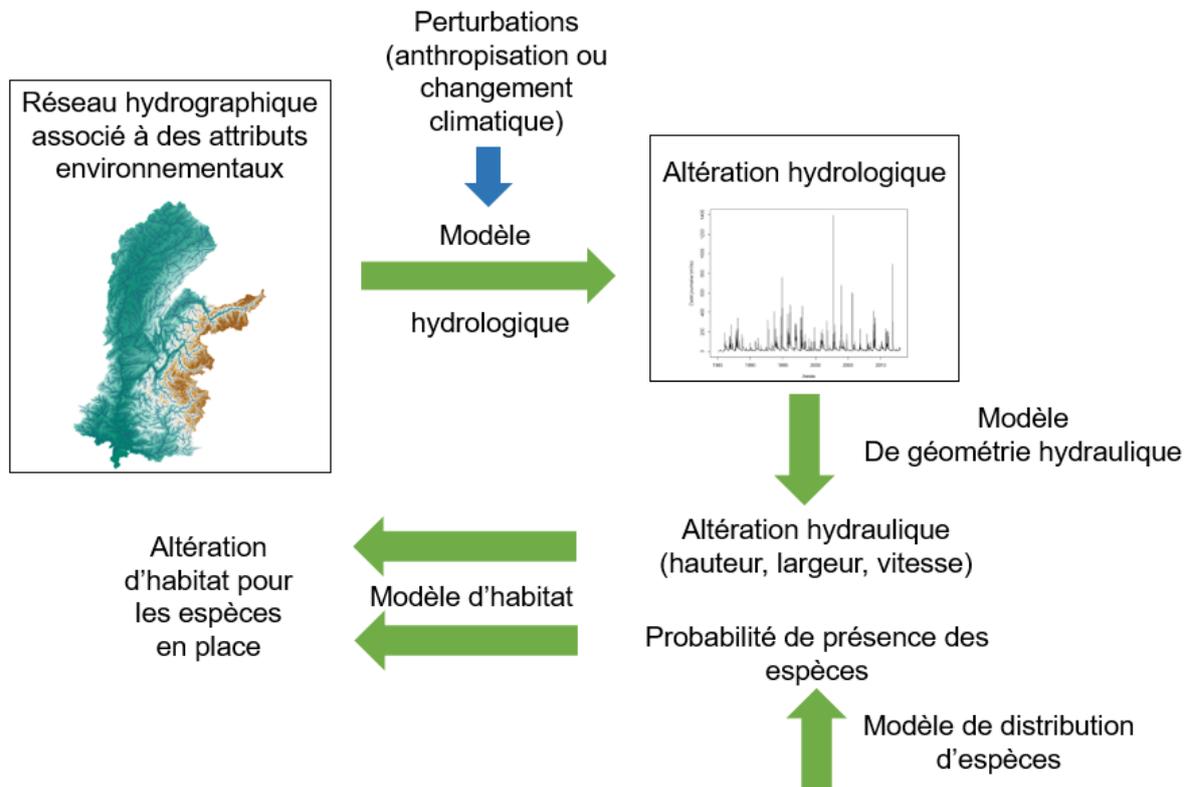
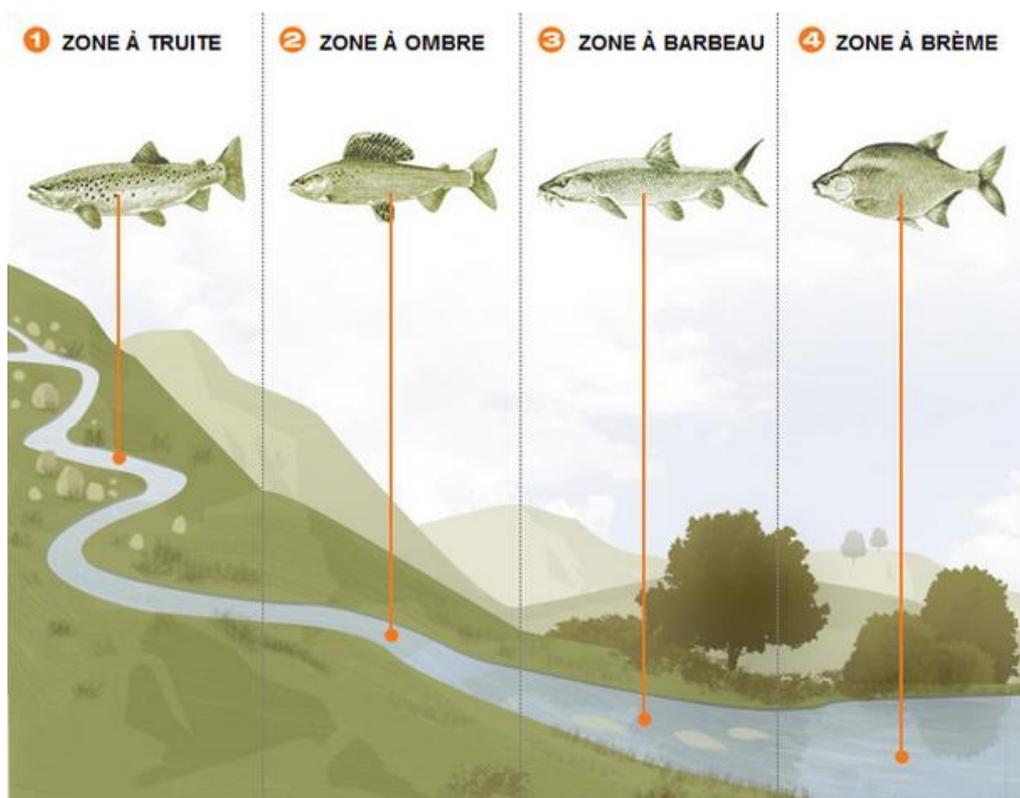


Figure 3: Méthodologie générale

Le bassin du Rhône, les différents modèles mis en jeu ainsi que les scénarios étudiés seront présentés. Une discussion autour des résultats sera ensuite développée afin d'appréhender l'impact de ces perturbations sur les habitats de poissons.

Par ailleurs, dans ce rapport seront explicités les probabilités de présence pour les espèces de la truite et du barbeau fluviatiles. Ces deux espèces sont extrêmement courantes dans le bassin du Rhône et présentent des préférences d'habitat très différentes. Ces espèces sont également représentatives dans la zonation piscicole (Figure 4).



*Figure 4: Zones piscicoles de Huet*

# Matériel et méthodes

## 1. Présentation de la zone d'étude

Situé en grande partie sur le territoire français et également en Suisse, le bassin versant du Rhône représente une surface totale d'environ 100 000 km<sup>2</sup> (1/6 de la France). Composé en grande partie par l'ex région Rhône-Alpes (Ain, Ardèche, Drôme, Isère, Loire, Savoie et Haute-Savoie), il présente une grande diversité de conditions hydro-climatiques du fait de la présence de massifs montagneux (Alpes, Jura, Massif Central). Il s'étend au Nord jusqu'à proximité des villes de Dijon, Besançon ou encore Belfort et au Sud à Avignon

Ce bassin présente également une grande diversité d'activités anthropiques (barrages et dérivations, irrigation, eau potable), seuls les ouvrages disposant de grands réservoirs sont représentés sur la figure 5 (Vmax représente la capacité du réservoir en millier de mètres cubes). Les ouvrages pris en compte sur cette carte ont été localisés lors d'une étude précédente (Branger et al., 2016) et sont explicités dans la suite du rapport.

Cette complexité et cette diversité en font une source d'étude récurrente dans la gestion de la ressource eau.

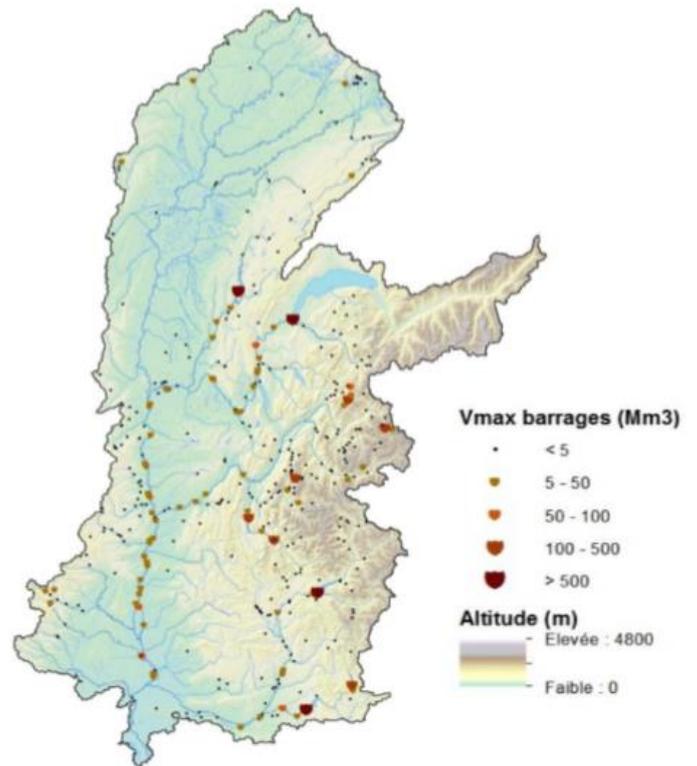


Figure 5: Carte du bassin du Rhône et localisation des grands ouvrages de régulation

Source : Projet Modélisation hydrologique distribuée du Rhône

## 2. Présentation des outils

### a. Le modèle hydrologique J2000

J2000 est un modèle hydrologique distribué développé la plate-forme de modélisation JAMS (annexe 1). Dimensionné pour des bassins allant d'une dizaine à plusieurs dizaines de milliers de km<sup>2</sup>, il fonctionne à partir d'un maillage irrégulier constitué d'Unités de Réponses Hydrologiques (HRU) qui correspondent à des unités homogènes du point de vue des processus hydrologiques (Figure 6).

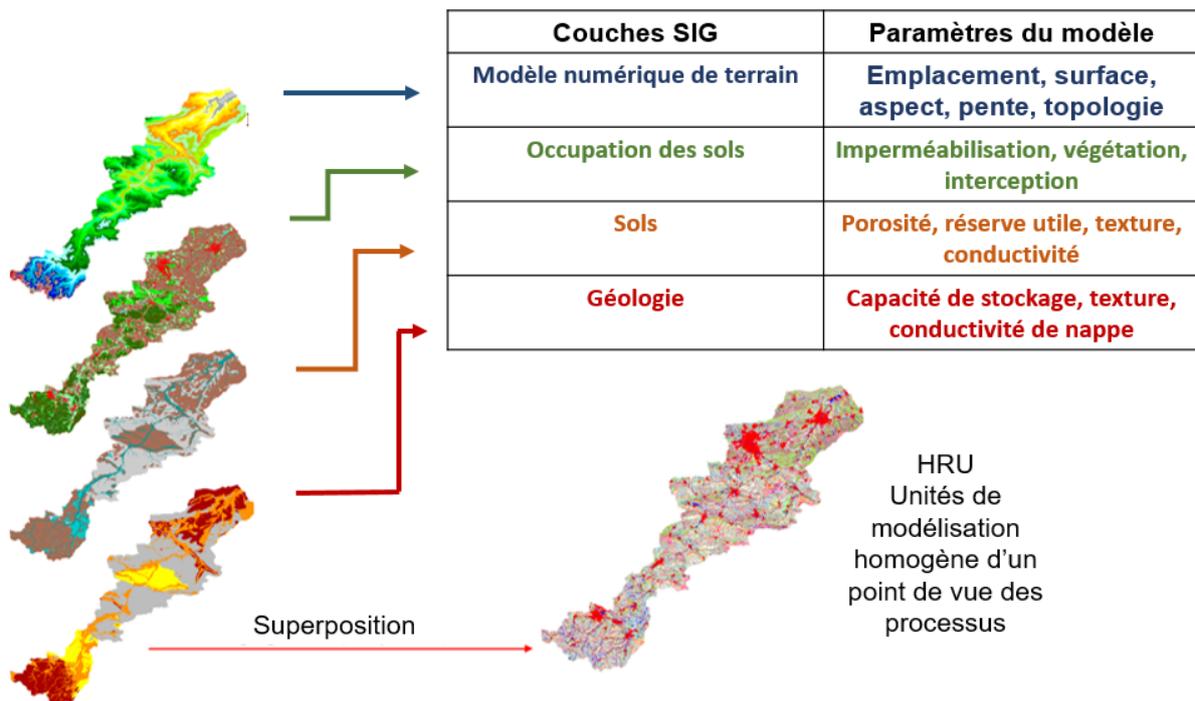


Figure 6: Composantes des unités de réponses hydrologiques  
Source : Projet Modélisation Hydrologique Distribuée du Rhône

J2000 réalise des simulations à pas de temps journalier. Il représente les processus hydrologiques suivant : Evapotranspiration, accumulation et fonte de la neige, infiltration, ruissellement, percolation vers la nappe, transferts dans le réseau hydrographique) et sont directement modifiables par l'utilisateur.

Ce modèle représente également les paramètres anthropiques de la zone d'étude (communes, barrages, stations hydrométriques). Les principes de la modélisation des ouvrages de régulation et de l'irrigation sont développés dans la suite du rapport (Résultats et discussion – 1.a)

Ce modèle a été utilisé dans l'étude « Modélisation hydrologique distribuée du Rhône » (Branger et al., 2013). Ce projet, à partir d'une demande de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, visait à modéliser les processus de la ressource en eau ainsi que ses différents usages (prélèvements et ouvrages), actuellement et également dans un cadre prospectif en étudiant notamment les conséquences du changement climatique.

## b. La modélisation statistique des habitats (outils ESTIMHAB, ESTIMKART)

Développé en 2010, le modèle « Estimkart » est un modèle d'habitat simplifié permettant de prendre en compte plusieurs caractéristiques environnementales (températures, altitude, distance à la source).

Lié à un réseau hydrographique, il est composé de quatre types de modèles (modèles hydrologiques, modèles hydrauliques, modèles de distribution d'espèces de poisson et modèles d'habitat hydraulique). Les différents modèles utilisés dans cette étude sont décrits dans la suite du rapport.

Les modèles hydrologiques ne sont toutefois pas implémentés physiquement dans la structure de l'approche, les résultats y sont seulement intégrés comme variables d'entrée.

Auparavant, une plateforme ESTIMKART existait et utilisait des scripts PYTHON sous l'environnement d'ArcGIS. Aujourd'hui, cette interface n'est plus utilisée et l'approche est réalisée par l'intermédiaire d'une bibliothèque de scripts R.

- Modèle de géométrie hydraulique

Dans le but de traduire le débit en caractéristiques hydrauliques, un modèle de géométrie hydraulique est nécessaire.

Ce modèle, à partir des données de débits obtenues grâce au modèle hydrologique permet d'obtenir, pour chaque tronçon du réseau, des valeurs de vitesse, de hauteur d'eau et de largeur mouillée.

Cette transformation se fait par une double approche. La première approche relie la hauteur d'eau, la largeur et la vitesse au débit sur chaque tronçon (géométrie dite « stationnelle » relative aux variations temporelles sur le tronçon), la deuxième approche reliant ces caractéristiques au module entre tronçons (géométrie dite « longitudinale » relative aux variations spatiales).

Leopold et Maddock (1953) ont proposé des lois puissance pour refléter les variations hydrauliques en fonction du débit. Lamouroux (2008) propose de combiner ces relations sous la forme :

$$L = a_d * \bar{Q}^{b_d} * \left[\frac{Q}{\bar{Q}}\right]^b \quad H = c_d * \bar{Q}^{f_d} * \left[\frac{Q}{\bar{Q}}\right]^f$$

Avec :

- L : Largeur mouillée
- H : Hauteur des tronçons
- $\bar{Q}$  : Débit journalier moyen inter-annuel
- $a_d, b_d, b, c_d, f_d, f$  : Coefficients de géométrie hydraulique

L'idée de la modélisation est de déterminer la valeur de ces coefficients de géométrie hydraulique afin d'en déduire L et H. Ces paramètres sont déterminés grâce à plusieurs variables d'entrée, comme la pente des tronçons ou la surface du bassin. Les formules permettant de déterminer la valeur des coefficients sont disponibles en annexe 2.

Ces formules ont été déterminées grâce à une analyse de mesures réalisées sur plusieurs dizaines de cours d'eau français (Lamouroux, 2008).

- Modèles écologiques : Modèles de distribution d'espèces et modèles d'habitat

Les modèles écologiques sont l'association de modèles de distribution d'espèces (1) et de modèles d'habitat (2).

### 1. Les modèles de distribution d'espèces

Les modèles de distribution (ou modèles de peuplement) prédisent la probabilité de présence d'espèces de poisson (Oberdorff, 2001) en fonction de caractéristiques environnementales du tronçon (pente, températures, profondeurs, distance à la source, surface du bassin versant).

Pour calibrer ces modèles, des pêches électriques ont été réalisées sur 738 sites d'étude sur une chronique de plus de 10 ans (1985-1998) (choisis par des experts piscicoles pour représenter à la fois des cours d'eau importants et également des cours d'eau de tête de bassin versant).

Précisément, les variables d'entrée de ces modèles sont :

$$\begin{aligned}
 G &= 3.015 - 0.347 \ln(S) - 0.544 \ln(D_{source}) \\
 A &= \ln(\text{Altitude}) \\
 V &= \ln(\bar{L}) + \ln(\text{pente}) + \ln(\bar{H}) - \ln(\bar{L} + 2 * \bar{H}) \\
 TV &= T_{juil} + T_{jan} \\
 TA &= T_{juil} - T_{jan}
 \end{aligned}$$

Avec :

- G : Gradient longitudinal
- S : Surface du bassin versant (km<sup>2</sup>)
- D<sub>source</sub> : Distance à la source (km)
- V : Indice de vitesse (la pente est exprimée en ‰)
- $\bar{L}$  : Largeur mouillée au débit inter-annuel (m)
- $\bar{H}$  : Hauteur d'eau du tronçon au débit inter-annuel (m)
- T<sub>jan</sub> : Température moyenne de l'air au mois de Janvier (°C)
- T<sub>juil</sub> : Température moyenne de l'air au mois de Juillet (°C)

Certaines de ces grandeurs sont directement extraites des attributs environnementaux du réseau hydrographique (surface de bassin versant, distance à la source, pente, températures, altitude).

Le réseau hydrographique et l'origine de ces données seront présentés dans la partie 4.a. La largeur mouillée ainsi que la hauteur d'eau du tronçon au débit inter-annuel sont déterminées par l'intermédiaire du modèle de géométrie hydraulique.

Ensuite, pour chaque espèce, la probabilité de présence est calculée à partir de ces grandeurs et de différents coefficients, établis par régressions logistiques. (Annexe 3).

Il est toutefois important de noter la présence de termes au carré dans l'équation permettant de calculer la probabilité de présence d'espèce. Ces polynômes du second degré permettent de refléter des liens non linéaires entre l'environnement et la probabilité de présence des espèces, fréquents en écologie (le barbeau se développe par exemple dans des rivières dont les températures moyennes sont comprises entre 12 et 18°C).

## 2. Les modèles d'habitat

Les modèles d'habitat hydraulique reflètent, eux, des variations temporelles d'abondance des espèces présentes en fonction des caractéristiques hydrauliques du tronçon. Ils font le lien entre les caractéristiques hydrauliques (vitesse, profondeur) et des modèles dits de préférences des espèces pour ces conditions hydrauliques.

Ces modèles permettent alors d'établir des valeurs d'habitat (le plus souvent normalisées sous forme de score entre 0 et 1) et peuvent être interprétées comme certaines caractéristiques propres à l'espèce (résistance au courant, aptitude de nage).

Un modèle hydraulique permettant de cartographier la zone d'étude en termes de grandeurs hydrauliques (comme la profondeur ou la vitesse) en fonction du débit, il est alors possible de traduire des modifications hydrologiques en variation de valeur d'habitat (figure 7).

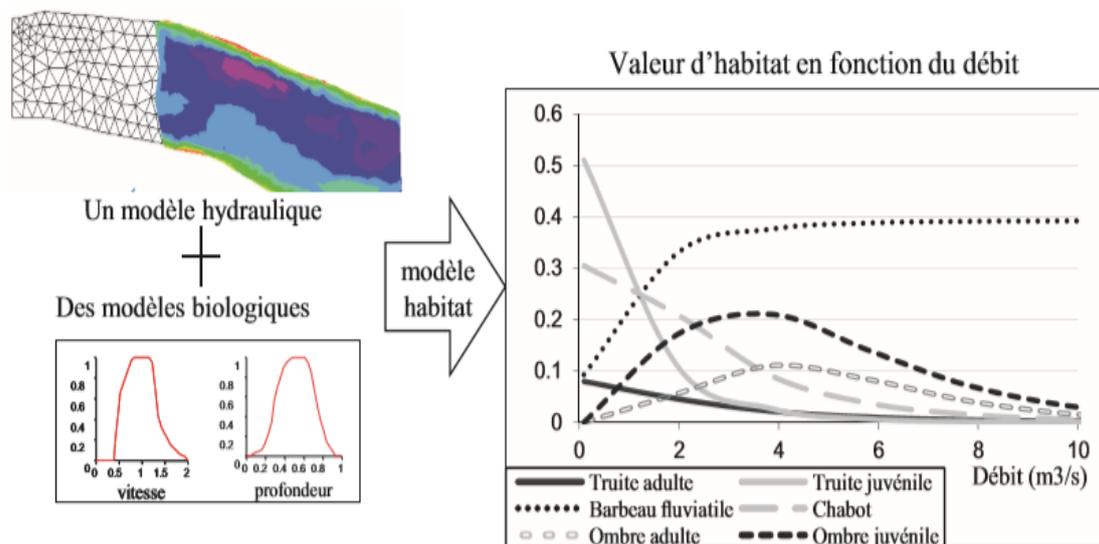
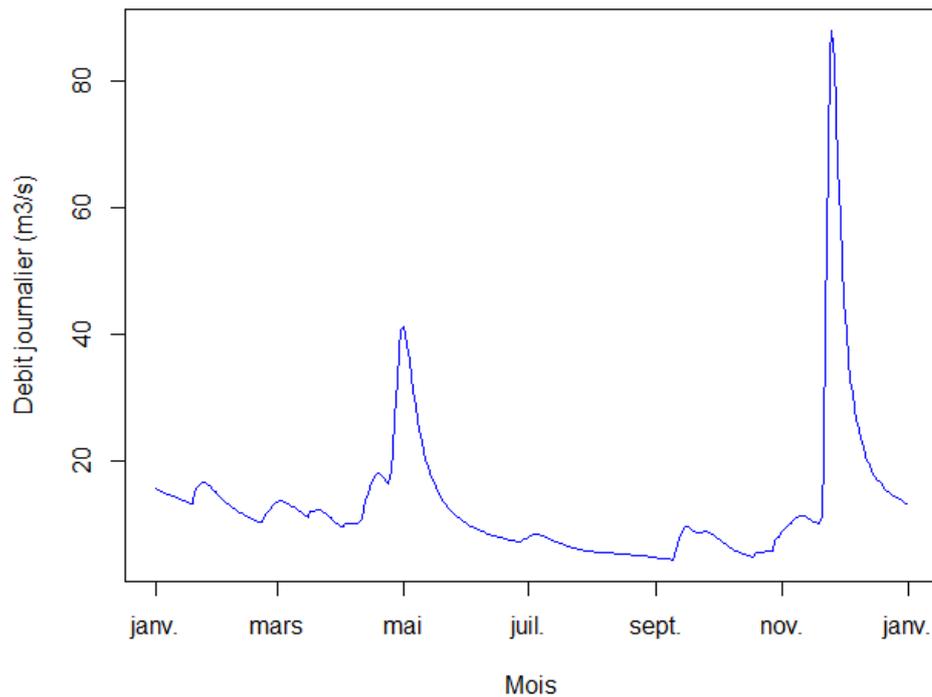


Figure 7: Principe du modèle d'habitat (Miguel et al., 2016)

La surface pondérée utile (SPU) peut alors être calculée en multipliant ces valeurs d'habitat et la surface du tronçon et permettre de synthétiser l'impact d'altération hydrologique sur l'habitat hydraulique. Cette SPU peut être interprétée comme une surface d'habitat favorable, sur le tronçon de cours d'eau, pour l'espèce considérée.

### 3. Traitement des débits : utilisation du modèle J2000

Les résultats du modèle J2000 exploités ici sont ceux obtenus à l'issue du projet MDR. Les séries de débits journaliers s'étendent de 1985 à 2012 (adéquation des données disponibles au niveau de la pluviométrie, des données de température et des prélèvements) (figure 8) sur l'ensemble du réseau J2000 (3 075 arcs). C'est alors plus de 30 millions de valeurs de débits qui ont été utilisées.



*Figure 8 : Débits journaliers (m3/s) : Exemple de l'arc 4752:*

L'approche ESTIMKART nécessite le calcul de plusieurs grandeurs hydrologiques dans le but d'avoir une traduction hydraulique complète :

- Le module (Moyenne interannuelle) : La chronique a été découpée en années afin de calculer les moyennes annuelles
- Q50 : Correspond au débit associé à la fréquence 0.5 (médiane de la chronique)
- Q95 : Correspond au débit associé à la fréquence 0.05 (débit dépassé 95% du temps)

La structure des peuplements de poissons dépend fortement des caractéristiques hydrauliques d'étiages fréquents (présents plusieurs semaines dans le cours d'eau) (Lamouroux et Olivier, 2015). De ce fait, les variations de surface utile pour les espèces (SPU) seront modélisées à un débit de Q95 ou au VCN15 (moyenne interannuelle des minimums des débits journaliers moyennés sur 15 jours). Pour cela, la chronique a tout d'abord été divisée en année. Des moyennes mobiles ont ensuite été calculées à partir des débits moyens journaliers sur une période de 15 jours.

Le minimum de chaque année a alors été extrait puis moyenné sur l'ensemble de la chronique. Ce débit correspond à un débit d'étiage moins sévère que le débit classé Q95. Il permet alors de représenter une situation plus fréquente.

## 4. Choix du réseau hydrographique

### a. Présentation du réseau hydrographique théorique et choix du réseau d'étude

L'approche ESTIMKART nécessite un réseau hydrographique (support de modélisation et estimation des attributs environnementaux).

Le modèle J2000 dispose de son propre réseau. Cependant, un autre réseau a été développé : le Réseau Hydrographique Théorique (RHT) (Pella et al., 2012). Ce réseau a été le support d'une précédente étude similaire (Miguel et al. 2016) :

Le RHT est un réseau dérivé du modèle numérique de terrain de la BD Alti<sup>®</sup>, reconditionné par le Réseau Hydrographique Etendu (RHE), lui-même dérivé du réseau hydrographique de référence de l'IGN, BD Carthage<sup>®</sup>.

S'étendant à la totalité du territoire français, il cumule 283 639 de linéaire (km) et totalise 114 601 tronçons, soit 80% du linéaire de la BD Carthage<sup>®</sup> (figure 9).

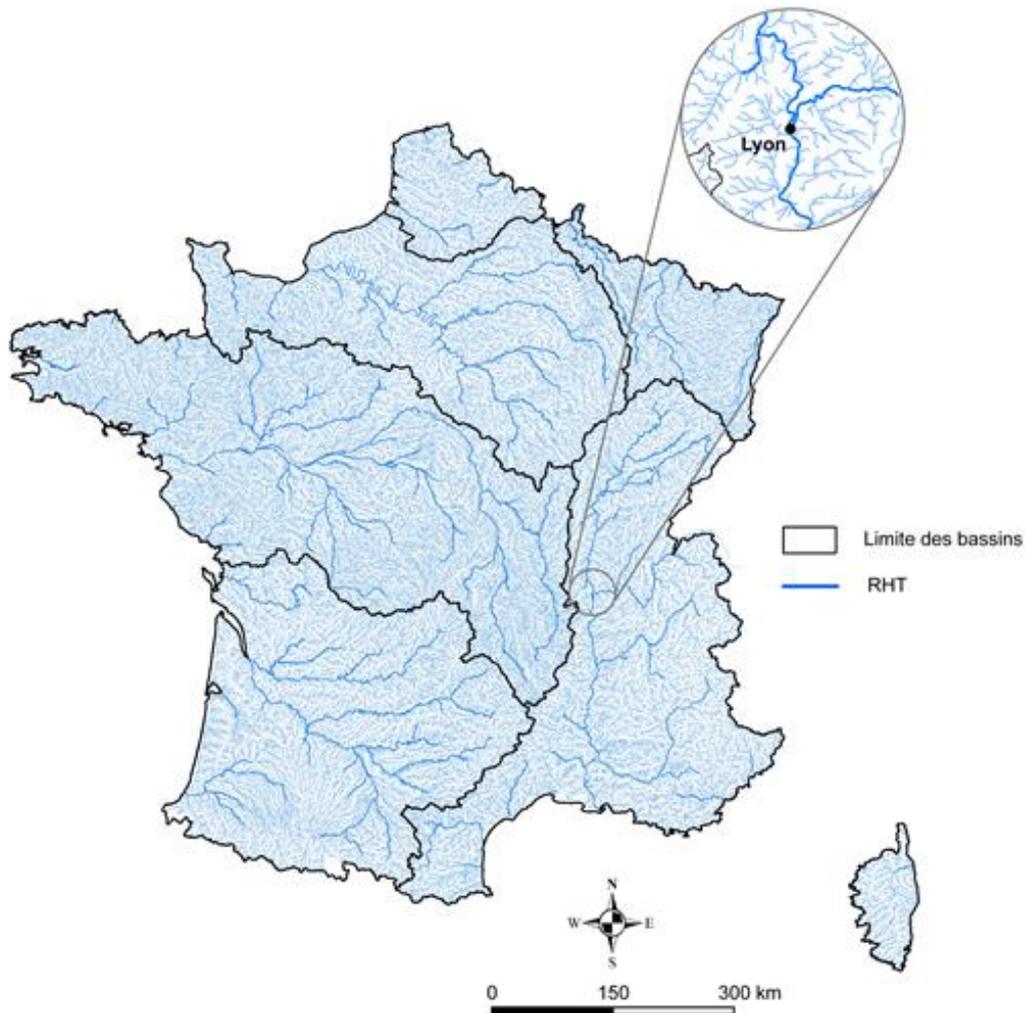


Figure 9: Réseau hydrographique théorique (Pella et al. 2012)

Ce réseau est jointif est orienté de l'amont vers l'aval, il permet alors de simuler les écoulements, tout en prenant en compte plusieurs attributs environnementaux (Tableau 1).

Attribut environnemental	Données utilisées	Méthodes utilisées
Altitude moyenne de l'arc	BD Alti IGN et RHT	Moyenne par zone tampon
Pente de l'arc	BD Alti IGN et RHT	Interpolation des altitudes des points amont et aval de l'arc
Distance à la source	RHT	Calcul des distances à l'exutoire depuis chaque tête de bassin
		Calcul de la distance maximale à la source
Ordination de l'arc (Strahler)	RHT	Ordination par un parcours amont aval
Surface cumulée du bassin versant	RHT	Cumul des superficies des bassins versants amont
Température de l'air de l'arc	Modèle AURELHY (Météo France) et RHT	Moyenne des températures par zone tampon
Débit de l'arc	Interpolation statistique (Sauquet, 2006) et RHT	Calcul des lames d'eau par bassin versant unitaire
		Calcul des débits spécifiques par bassin versant unitaire
		Cumul des débits spécifiques

*Tableau 1: Attributs environnementaux calculés (Pella et al. 2012)*

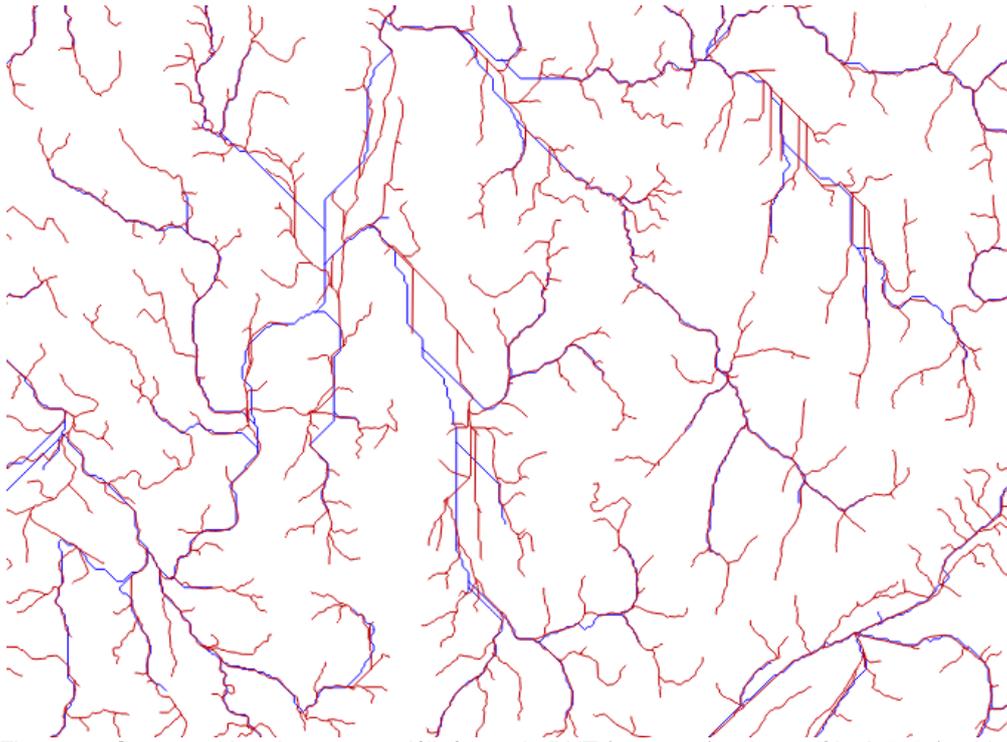
Ces paramètres environnementaux ont été testés et validés par comparaison à d'autres réseaux (BD Carthage®), et grâce aux stations de mesures de la banque Hydro pour les débits (Annexe 4 et 5).

Le RHT est plus détaillé que le réseau utilisé dans le modèle J2000. En effet, plus d'arcs sont modélisés (Tableau 2). L'utilisation de celui-ci serait alors plus intéressante et permettrait d'obtenir plus de résultats, en particulier dans les têtes de bassin versants.

	Nombre d'arcs modélisés	Longueur cumulée (km)
Modèle J2000	3 075	17 156
Réseau hydrographique théorique (RHT)	18 457	43 237

*Tableau 2: Arcs modélisés sur le bassin du Rhône*

La création d'un réseau hydrographique est en grande partie basée sur l'utilisation d'un modèle numérique de terrain. Suivant la précision du MTN, le tracé peut différer d'un réseau à l'autre surtout dans les zones de faibles pentes. Ces problèmes de superposition rendent le rapprochement des deux réseaux difficiles à réaliser (figure 10).



*Figure 10: Superposition des arcs modélisés sur le RHT (en rouge) et le modèle J2000 (en bleu)*

Le simple transfert des sorties du modèles J2000 sur le RHT apparaît alors impossible à mettre en œuvre.

Initialement, ces problèmes de tracé ont poussé à utiliser le réseau J2000 comme réseau d'étude (support de modélisation et source des attributs environnementaux), le raccordement des deux réseaux étant trop compliqué à réaliser. Une étude préalable a alors été réalisée sur le réseau J2000 afin d'évaluer la fiabilité des attributs environnementaux. Cette étude est disponible en annexe 6, 7 et 8.

Cette étude a montré que ces problèmes de tracé peuvent alors affecter une partie très importante du réseau (notamment la surface du bassin versant amont). Il a alors été nécessaire d'utiliser les caractéristiques environnementales du RHT, plus fiables, et de n'utiliser le réseau J2000 uniquement pour les débits, le raccordement du réseau J2000 sur le RHT étant trop complexe à mettre en œuvre sur une zone d'étude aussi étendue.

Une correspondance entre les deux réseaux a alors été établie selon plusieurs critères dans le but d'associer aux arcs RHT les débits simulés sur J2000.

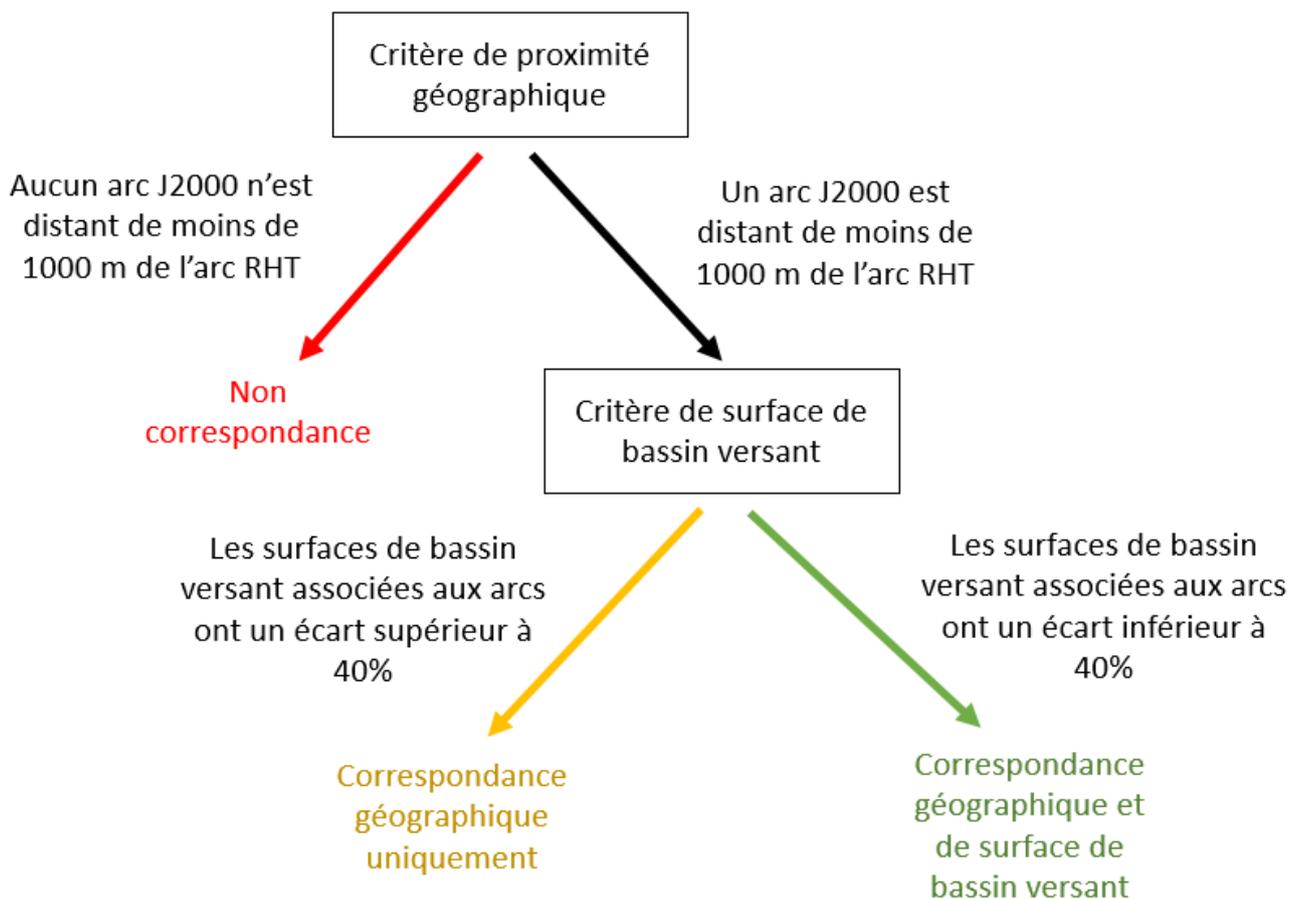
### b. Correspondance J2000-RHT

Le modèle J2000 a été calé et validé grâce aux stations hydrométriques sur le bassin du Rhône (234 stations de contrôle avec des mesures de débits fiables et peu influencées) (Annexe 9). A proximité de ces stations hydrométriques, le tracé du réseau J2000 a été modifié pour les intercepter. Il a alors été possible de transférer directement les débits des arcs J2000 au RHT sur ces zones.

Les réseaux J2000 et le RHT ont été joints par leur proximité géographique et leurs attributs environnementaux. Une correspondance entre les deux réseaux a alors été établie dans le but d'affecter les débits de J2000 aux arcs du RHT.

Dans un premier temps, tous les arcs du RHT ayant un ordre de Strahler de 1 ont été abandonnés, celui-ci remontant plus haut que le modèle J2000.

Cette correspondance a ensuite été faite sur un critère de proximité géographique puis un critère de surface de bassin versant (figure 11).



*Figure 11: Correspondance J2000/RHT*

Cette correspondance a alors permis d'utiliser plus des deux tiers des données de débit de J2000 (2055 arcs J2000 ont une correspondance géographique et de surface de bassin versant amont avec un arc du RHT), et 5688 arcs du RHT sont liés à un arc de J2000 (plusieurs arcs RHT peuvent être liés à un même arc J2000).

Cette superposition a écarté les arcs du RHT ayant une petite surface de bassin versant amont. Au contraire, les arcs ayant une surface de bassin versant amont suffisamment importante (environ 10 km<sup>2</sup>) ont trouvé une correspondance (annexe 10).

Dans le but d'avoir un réseau le plus complet possible, l'étude s'est ensuite portée sur la recherche de récupération des arcs ayant eu une correspondance géographique uniquement. Le réseau RHT remontant plus dans les têtes de bassins versants, la surface de bassin amont pouvait être plus importante pour certains arcs du RHT tout en présentant une bonne superposition géographique.

La méthodologie est développée en annexe 11.

### c. Synthèse du réseau hydrographique finalement utilisé

L'étude est donc basée sur une partie du RHT, munie des débits simulés par le modèle hydrologique J2000 (figure 12).

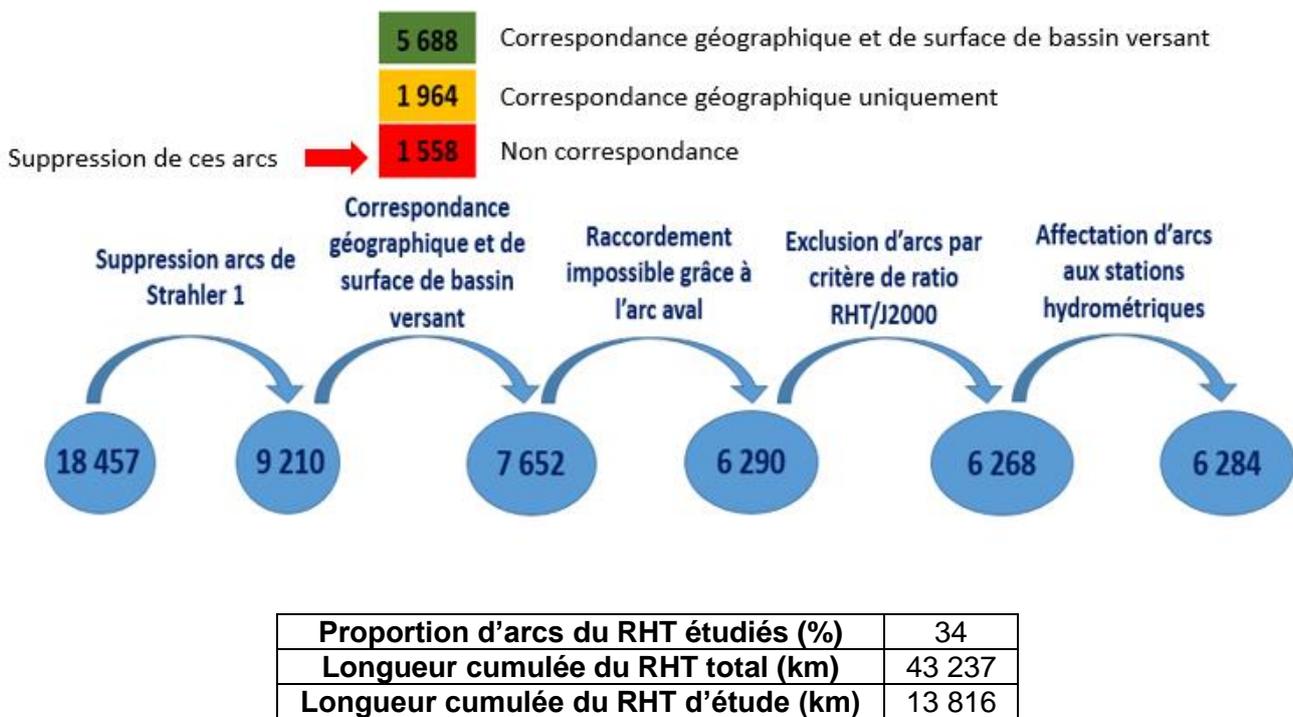


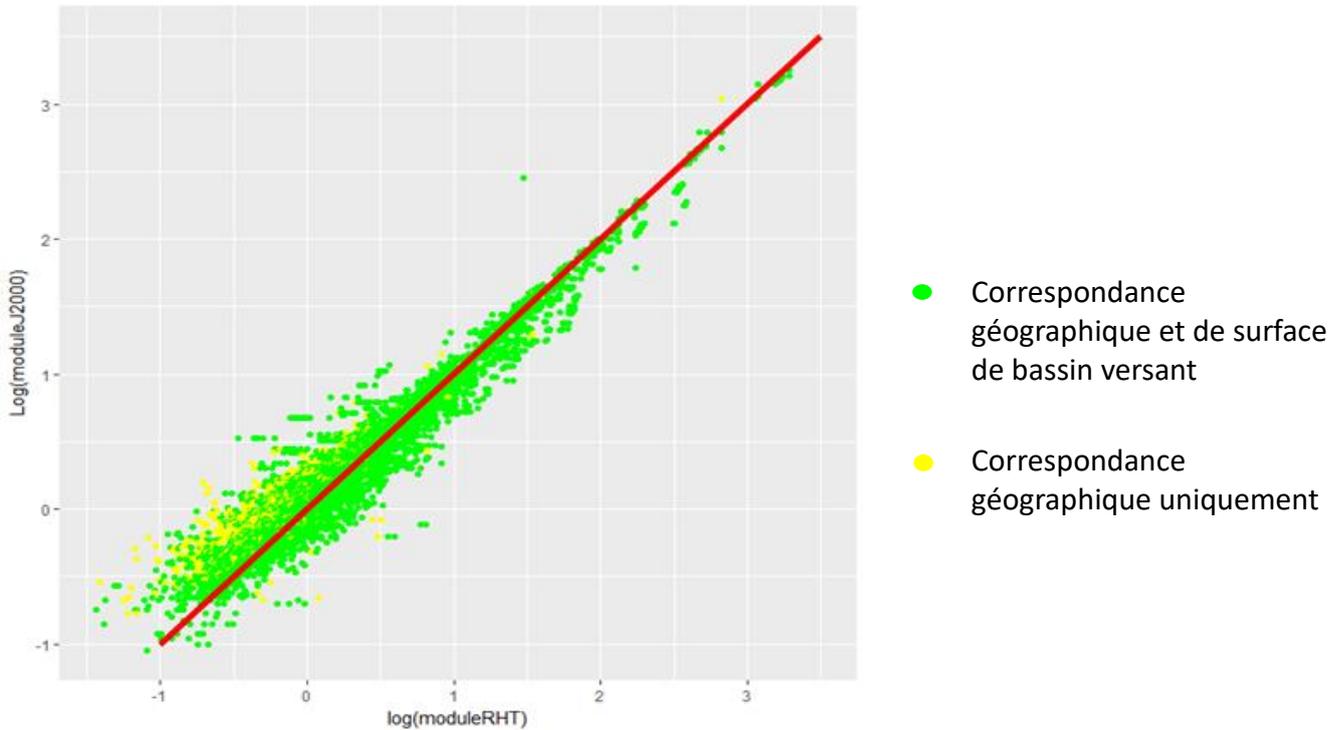
Figure 12: Synthèse de l'adaptation du réseau hydrographique et du nombre d'arcs étudiés

Le réseau hydrographique résultant du rapprochement est alors discontinu. Cette discontinuité n'a cependant pas d'importance. En effet, aucune modélisation hydrologique n'est prévue directement à partir de celui-ci. Ces modélisations se feront encore sur le réseau J2000 puis associé au RHT grâce à la correspondance établie.

De plus, malgré la suppression des arcs de Strahler d'ordre 1, le réseau établi a une bonne représentativité du bassin du Rhône, notamment avec de nombreux arcs de têtes de bassin versant.

#### d. Vérification des débits et des probabilités de présence d'espèces

Afin de confirmer la validité des modules obtenus par le modèle J2000, ces derniers ont été comparés aux modules associés aux RHT, obtenus par extrapolation spatiales d'observations issues de la banque Hydro (Sauquet, 2006) (Figure 13).



*Figure 13: Comparaison des modules J2000/RHT du réseau hydrographique final*

Une bonne corrélation est alors observée pour l'ensemble des arcs conservés dans l'étude, tout en signalant encore une fois des différences plus marquées pour les faibles débits, liées aux incertitudes de simulation.

Dans le but de vérifier les valeurs des probabilités de présence pour ces deux espèces, les résultats obtenus avec les débits de J2000 ont été comparés avec les résultats liés aux débits du RHT.

Malgré des différences, les probabilités de présence apparaissent très similaires. (Figure 14 et 15).

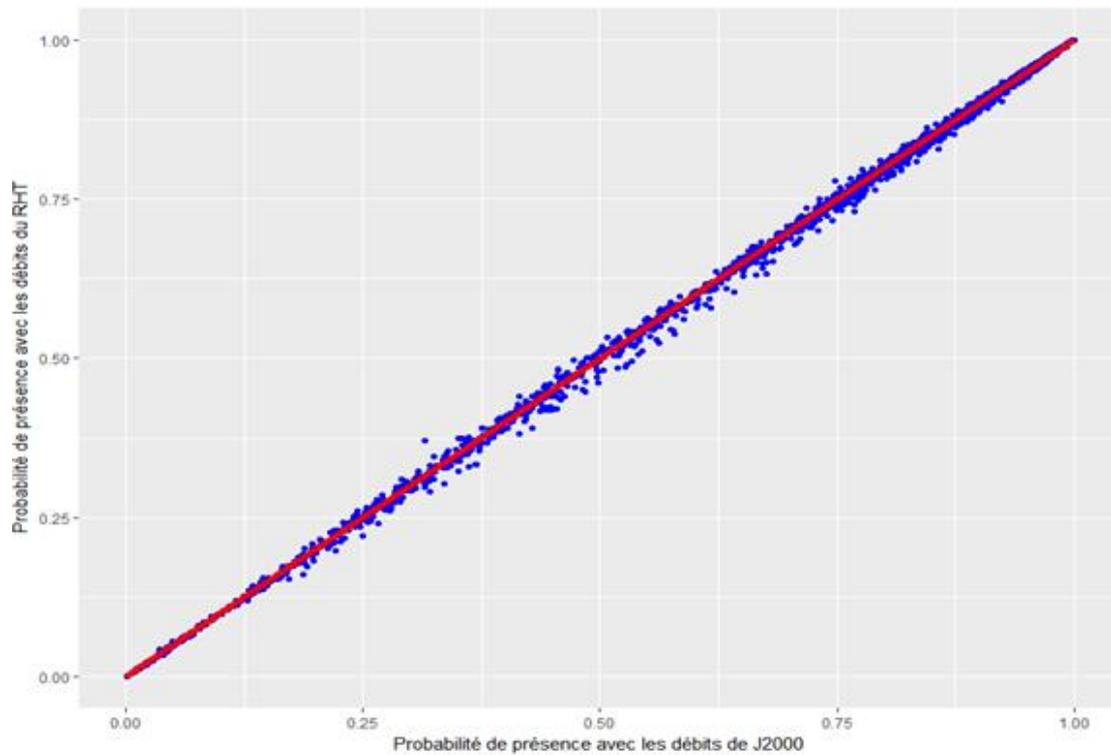


Figure 14: Comparaison des probabilités de présence de la truite selon les débits de J2000 et ceux du RHT

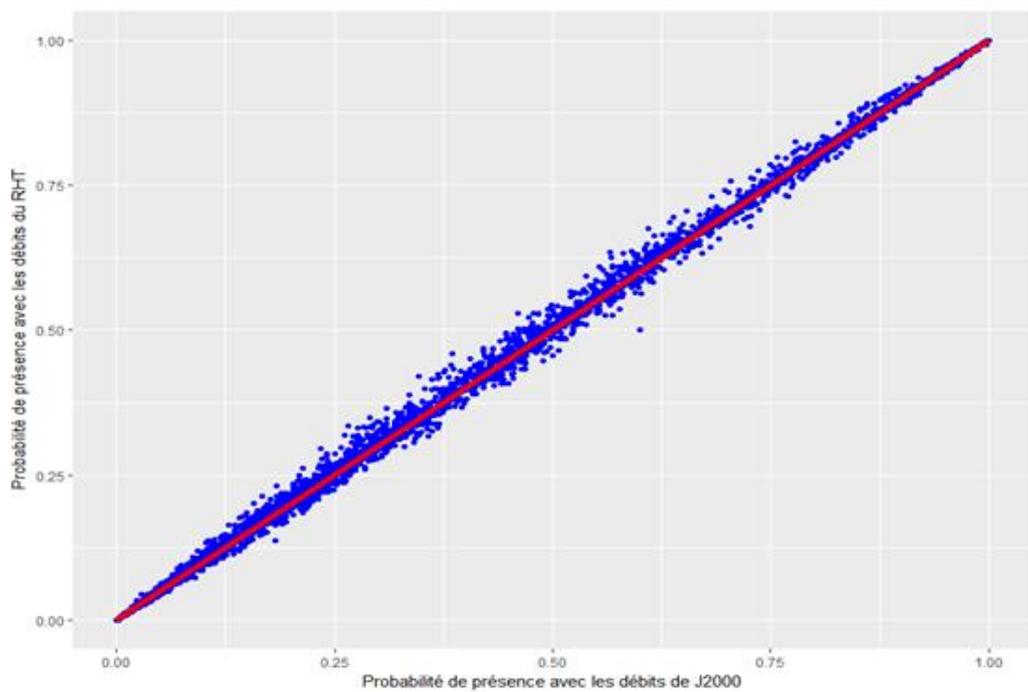


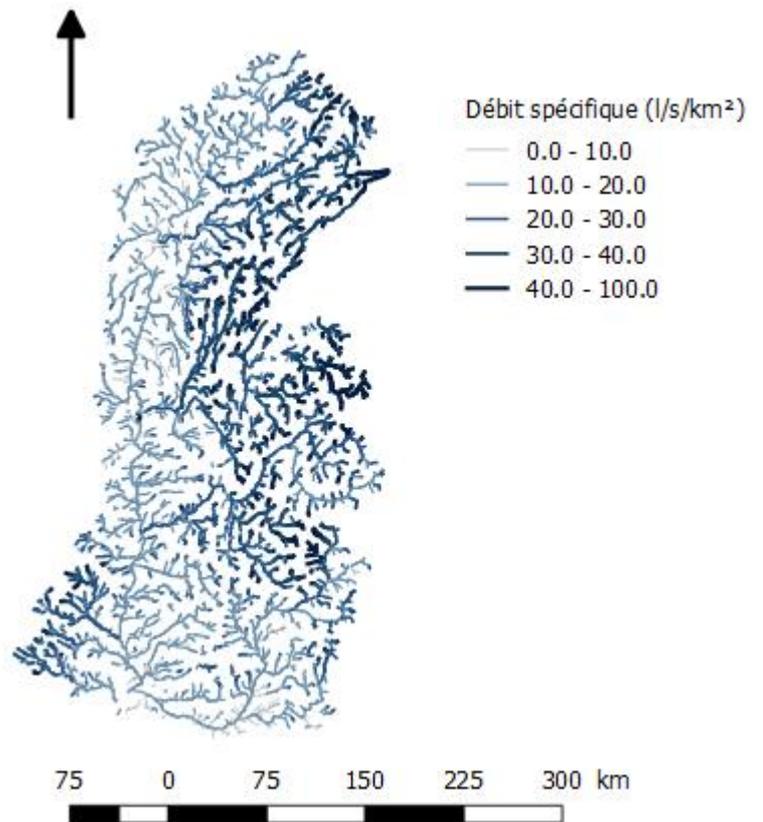
Figure 15: Comparaison des probabilités de présence du barbeau selon les débits de J2000 et ceux du RHT

### e. Carte des débits et de probabilité de présence d'espèce

Une fois le réseau hydrographique adapté à l'étude, la répartition des débits sur le bassin versant d'étude (figure 16) a pu être observée sur le bassin du Rhône actuel.

La répartition des débits spécifiques ( $l/s/km^2$ ) apparaît comme cohérente sur l'ensemble du bassin du Rhône. Ce choix de débit permet la comparaison et l'appréhension de l'importance de différents cours d'eau situés sur des bassins différents.

Les zones productives (massifs montagneux comme les Alpes) ressortent.



*Figure 16: Carte des débits ( $l/s/km^2$ ) sur le bassin du Rhône naturel (sans irrigation ni ouvrages de régulation)*

Les répartitions des probabilités de présence de la truite et du barbeau sont également disponibles sur ce même réseau (figure 17).

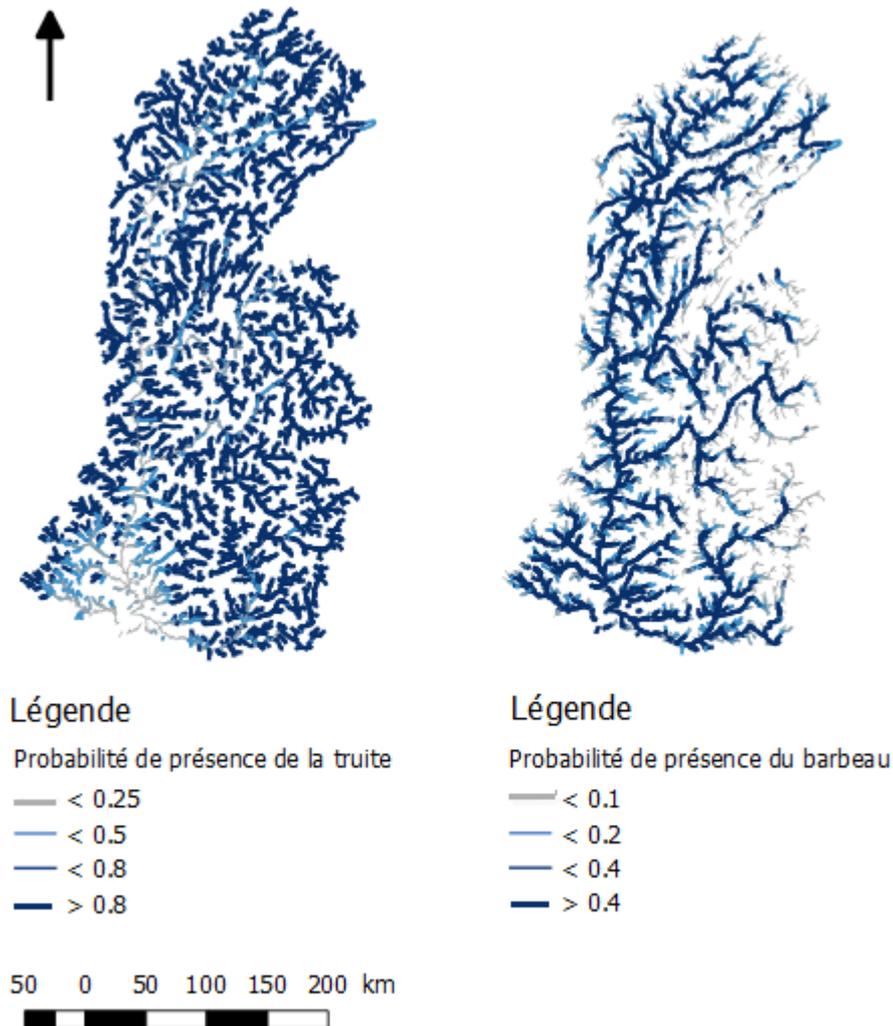


Figure 17 : Carte des probabilités de présence de la truite et du barbeau

Les cartes de la figure 17 sont tracées de manière à faire apparaître un seuil (0.8 pour la truite et 0.4 pour le barbeau). Disponible pour toutes les espèces (Logez *et al.*, 2012), il permet de maximiser les taux de bonnes prédictions des présences et des absences.

La truite fait partie des salmonidés et préfère les eaux vives et fraîches, sa présence apparaît alors cohérente dans les têtes de bassin versant.

Au contraire, le barbeau préfère les cours d'eau importants de plaine.

# Résultats et discussion

## 1. Présentation des scénarios

Le but de l'étude est de traduire l'impact de modifications hydrologiques en modifications d'habitat. Pour cela, les caractéristiques hydrologiques « perturbées », liées à l'anthropisation du bassin (ouvrages de régulation et irrigation) ou au changement climatique sont à comparer à un contexte naturel ou naturalisé.

### a. Ouvrages de régulation du débit et irrigation

La localisation de ces ouvrages a été faite selon deux bases de données : la BD SIOUH (Direction Générale de la Prévention des Risques) et une base interne d'Irstea (Chandesris et Pella, 2006) (Figure 5).

Seuls les ouvrages disposant de grands réservoirs ont toutefois été simulés, ces derniers pouvant impacter très fortement le régime hydrologique (annexe 12). Au total, 12 barrages, 2 ouvrages de dérivation et 3 ouvrages de transfert ont été modélisés dans J2000.

Un très grand nombre de petits ouvrages, en particuliers sur les petits cours d'eau, ne font alors pas partie de la modélisation.

La modélisation de l'irrigation est basée sur deux données. (Annexe 13)

Premièrement, des chroniques de prélèvements d'eau ont été réalisées à partir des redevances annuelles de prélèvements de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse sur la période 1987-2011. Ces redevances sont liées aux communes, sans être précisément géo-référencée.

Un recensement des parcelles, réalisé en 2010, a ensuite permis de connaître le nombre et la superficie irriguée des exploitations pour différents types de cultures.

Le couplage de ces informations permet alors d'appréhender la répartition des besoins en eau liés à l'irrigation.

L'hypothèse est faite que l'irrigation est prélevée dans le brin de rivière le plus proche.

### b. Changement climatique

Les scénarios de changement climatique développés dans cette étude sont nommés scénarios 8.5 et 2.6. Ces appellations font référence au forçage radiatif (différence entre le rayonnement entrant et le rayonnement sortant au sommet de la troposphère en  $W/m^2$ ) (figure 18) et à la classification usuelle en RCP. Le forçage radiatif étant directement lié à l'émission de gaz à effet de serre impliquant des perturbations météorologiques (hausse de la température en particulier).

Les modifications de température et de pluviométrie sont représentées en annexes 14 et 15.

Ce sont les résultats des modèles développés par les laboratoires français de modélisation du climat (IPSL, CERFACS, CNRMGAME) et mis à disposition sur le portail DRIAS ([www.drias-climat.fr](http://www.drias-climat.fr))

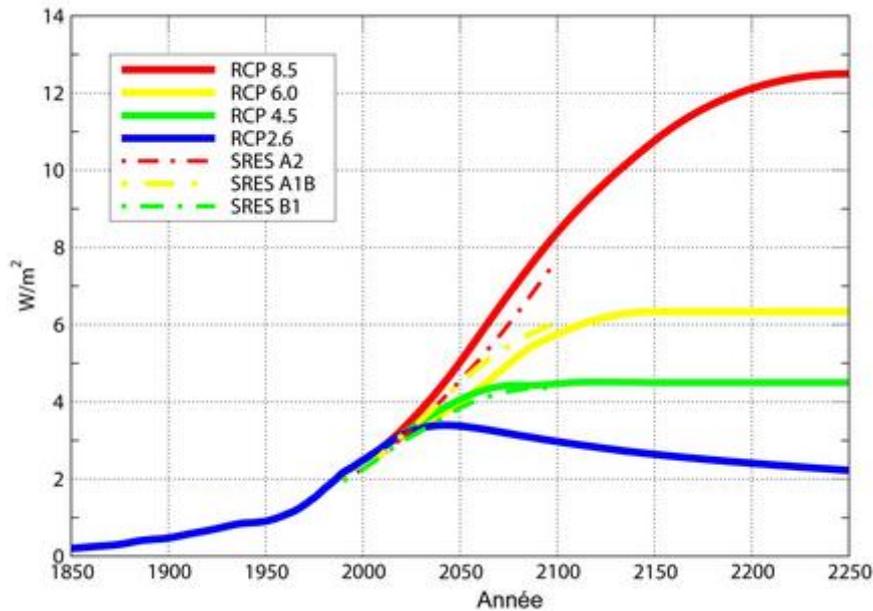


Figure 18: Forçage radiatif estimé pour les différents scénarios de référence (Source : DRIAS)

Cette approche permet d'appréhender une grande variété de possibilités, liées à l'émission des gaz à effet de serre au niveau mondial.

Le scénario 8.5 apparaît comme pessimiste avec une augmentation croissante des gaz à effet de serre (croissance de l'industrie). Au contraire, le scénario 2.6 semble plus optimiste (décroissance après un pic d'émission liée à des politiques croissantes en développement durable)

La modélisation des ouvrages et de l'irrigation dans la période future (2075-2100) est identique à celui de la période actuelle (1985-2012). Par exemple, les types de culture et les superficies de surface irriguée sont supposés identiques.

Les différents scénarios développés et leur contexte de référence associé sont synthétisés dans le tableau 3.

Scénario étudié	Contexte de référence
Impact de l'anthropisation – Période actuelle (1985-2012)	Bassin naturel actuel (1985-2012)
Impact pur du changement climatique (2075-2100)	Bassin naturel actuel (1985-2012)
Impact de l'anthropisation – Période future (2075-2100)	Bassin naturel futur (2075-2100)

Tableau 3: Tableau récapitulatif des différents scénarios étudiés et de leur contexte de référence associé

### c. Éléments méthodologiques

Les mêmes manipulations ont alors été effectuées sur l'ensemble des scénarios étudiés afin d'étudier l'écart entre un contexte de référence et le contexte étudié (calcul des moyennes interannuelles, Q50, Q95, VCN15). Ces débits permettent de décrire de manière détaillée le contexte hydrologique du bassin et d'appréhender plus précisément les modifications hydrologiques.

Les modifications hydrologiques et d'habitat ont été calculées de la manière suivante :

$$\Delta Q = \frac{Q_{\text{perturbé}} - Q_{\text{référence}}}{Q_{\text{référence}}} \quad \Delta SPU = \frac{SPU_{\text{perturbée}} - SPU_{\text{référence}}}{SPU_{\text{référence}}}$$

Les modifications négatives correspondent à une perte, les modifications positives correspondent à un gain. Dans le cas d'ouvrage de régulation, les modifications positives peuvent correspondre à un soutien d'étiage.

La SPU n'est définie que si le seuil de probabilité de présence de l'espèce est dépassé. Les cartes présentées dans la suite du rapport peuvent faire apparaître les légendes « Nouvel arc » et « Arc disparu ». La légende « Nouvel arc » correspond à une SPU définie dans le scénario perturbé mais pas dans le scénario de référence. Le cas contraire correspond à la légende « Arc disparu ». Ces légendes traduisent donc des modifications des zones de peuplement.

Dans le but de quantifier et de représenter l'impact des modifications hydrologiques sur les habitats de poissons (SPU), il est important d'agréger ces modifications sur un ensemble d'arcs, les incertitudes à l'échelle du tronçon pouvant être très importantes (cette partie est développée dans la partie incertitudes).

De plus, la très grande majorité des arcs présentent des modifications hydrologiques et d'habitat très faibles (<5%), une étude statistique à l'aide de grandeurs caractéristiques (comme le calcul d'une médiane de modifications hydrologiques ou d'habitat) est alors à proscrire car cela ne permettrait pas de mettre en lumière les tronçons fortement modifiés.

Le choix a alors été fait de traduire les arcs subissant des modifications importantes (et en particulier les modifications < -30% représentant une perte importante au niveau du débit ou de l'habitat) en terme de pourcentage de longueur par rapport à la longueur totale des arcs composant le sous ensemble considéré.

Les statistiques concernant les modifications d'habitat sont calculées uniquement sur les cours d'eau où les espèces sont présentes (où les seuils de probabilités de présence sont dépassés) dans le contexte de référence.

Le bassin du Rhône a alors été découpé en plusieurs entités correspondant aux sous-bassins DCE administratifs (Figure 19).



Figure 19: Découpage du bassin du Rhône en sous-bassins DCE administratifs (2016)

Ces sous-bassins correspondent à un niveau d'agrégation entre la masse d'eau et le bassin DCE et sont définis comme les zones de compétence des commissions territoriales, ayant pour but l'élaborations d'actions par les acteurs locaux ainsi que le suivi de ces actions dans les territoires.

## 1. Impact de l'anthropisation – Période actuelle (1985-2012)

Le modèle hydrologique J2000 a permis la simulation des différents débits (module, Q50, Q95 et VCN15) dans le contexte réel (ici le bassin anthropisé) et également pour le contexte naturalisé pour la période actuelle.

La figure 20 représente les modifications hydrologiques liées à l'anthropisation du bassin (ouvrages simulés de régulation et irrigation).

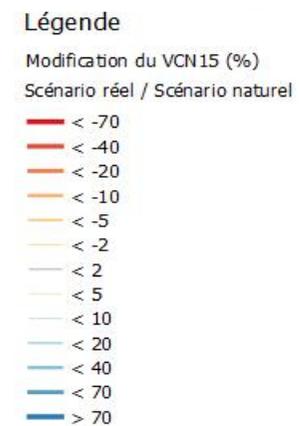
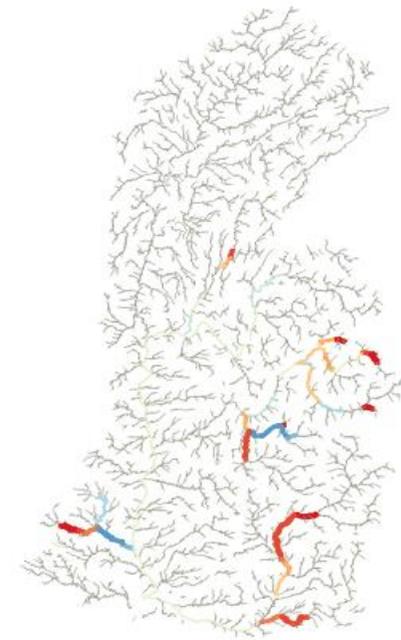
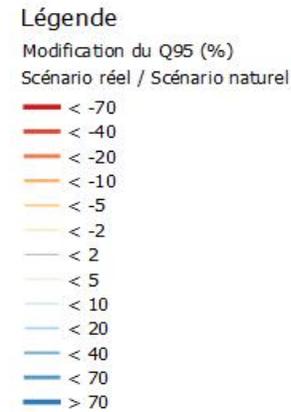
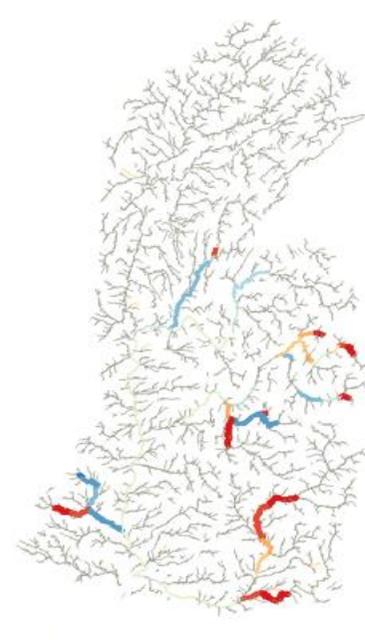
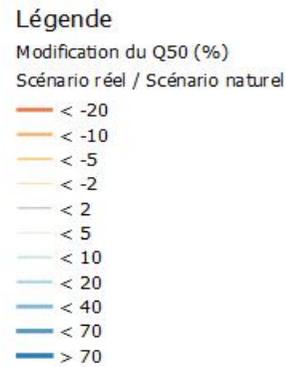
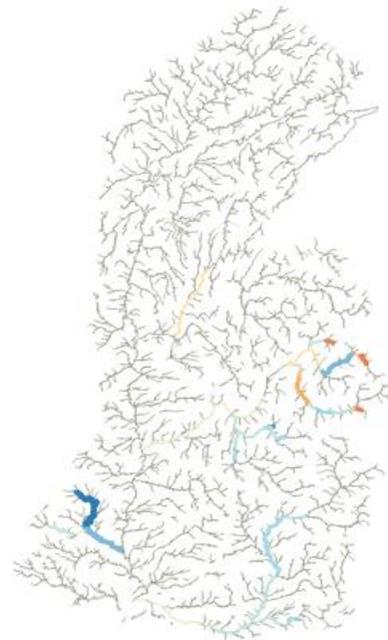
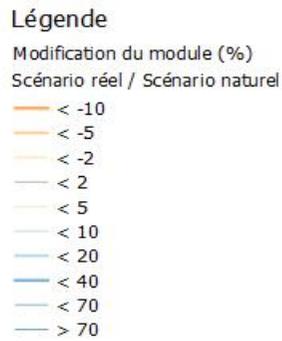
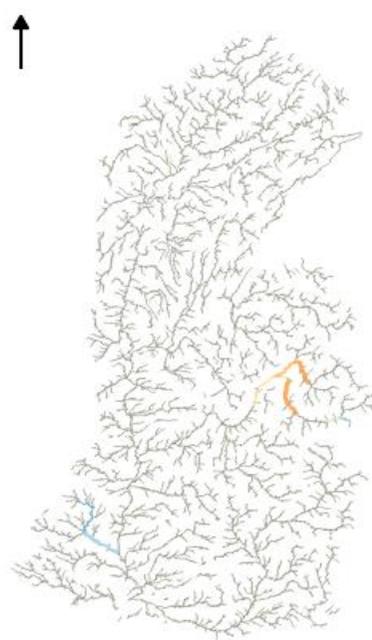


Figure 20: Modifications hydrologiques (%) du scénario anthropisé (irrigation et ouvrages de gestion de débits) comparé au scénario naturel (sans anthropisation) pour les moyennes interannuelles (modules), Q50, Q95 et VCN15 sur l'ensemble du bassin d'étude

Les modifications hydrologiques importantes sont observées principalement pour les Q95 et les VCN15. Cette observation apparaît comme cohérente, ces derniers correspondant à des débits faibles pouvant être impactés de manière plus significative par des prélèvements.

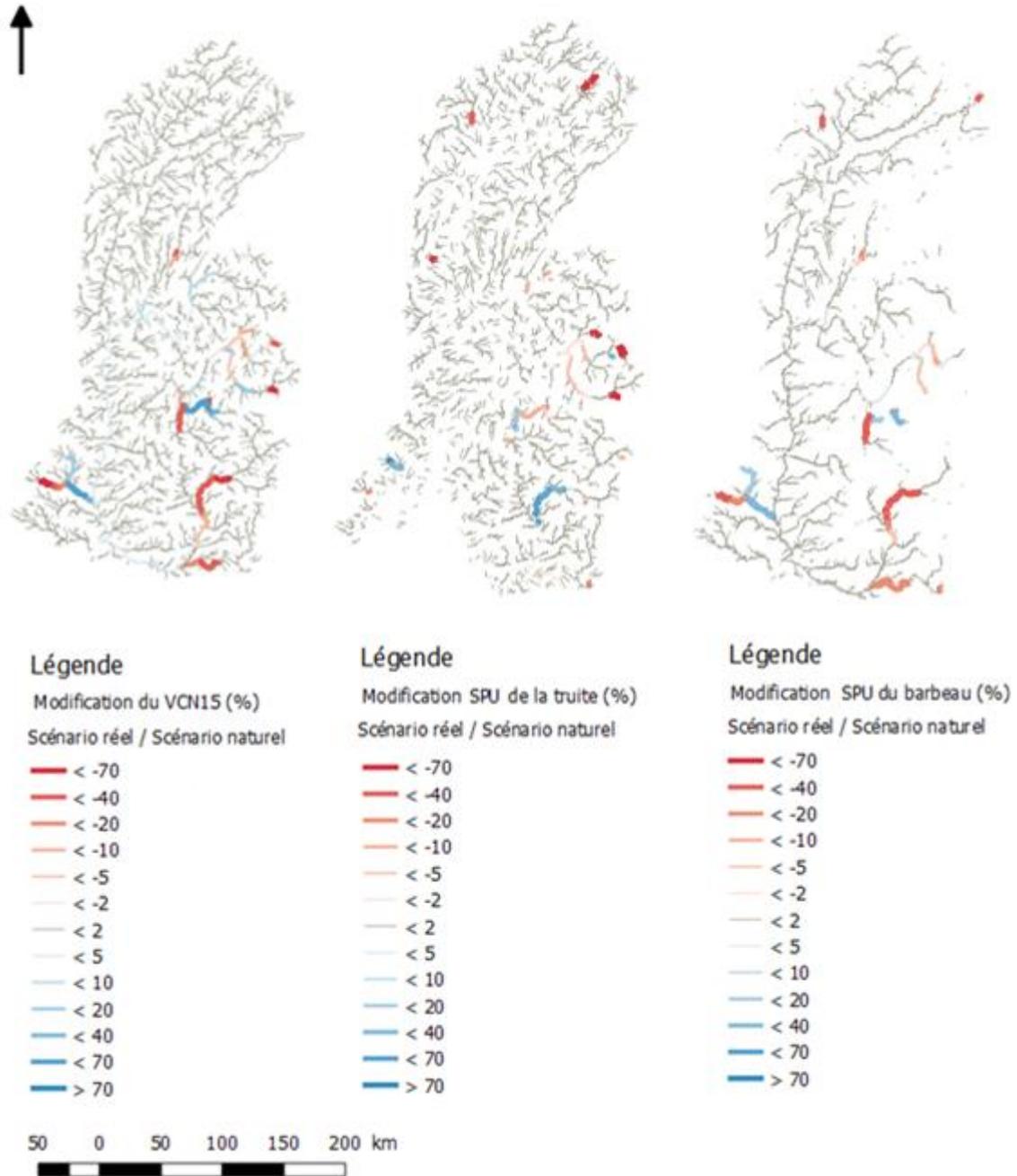


Figure 21: Modifications d'habitat (en %) liées à l'anthropisation du bassin pour les espèces de la truite et du barbeau

Le scénario étudié ici (impact de l'anthropisation – Période actuelle) présente des modifications importantes dans trois de ces sous-bassins : la Durance, le Gard et Isère Drôme (tableau 4)

L'irrigation semble avoir ici un impact marginal sur les habitats de poissons (très peu de modifications dans le sous-bassin de la Saône par exemple).

	Durance	Gard	Isère Drome
<b>Distance totale (km)</b>	2 787	1 542	2 334
<b>Cours d'eau à truite (%)</b>	68.8	53.6	68.9
<b>Cours d'eau à barbeau(%)</b>	45.8	47.8	32.4
<b>Cours d'eau ayant une modification hydrologique (%) &lt; -30 (%)</b>	4.16	2.87	2,58
<b>Cours d'eau à truite ayant une modification d'habitat (%) &lt; -30 (%)</b>	0	0	1,20
<b>Cours d'eau à barbeau ayant une modification d'habitat (%) &lt; -30 (%)</b>	7.81	0.04	4.17

*Tableau 4: Tableau récapitulatif de l'impact de l'anthropisation du bassin - Période actuelle*

Il apparaît également que les cours d'eau présentant une forte altération hydrologique (< -30 %) ne représentent qu'une très faible partie des cours d'eau du sous-bassin en question (moins de 5%). Les effets des ouvrages de régulation modélisés et de l'irrigation sont alors très ponctuels et ne semblent pas se propager aux cours d'eau aval.

Il est toutefois important de rappeler que seuls de grands ouvrages de régulation ont été modélisés. Les petits ouvrages susceptibles d'impacter directement les têtes de bassin versant ne font pas partie du projet MDR dont héritent les simulations hydrologiques.

La proportion de cours d'eau subissant de fortes altérations d'habitat (< -30 %) montre également que le lien entre les modifications hydrologiques et les modifications d'habitat dépend fortement de l'espèce. En effet, aucun cours d'eau à truite sur les sous-bassins étudiés ne présente d'altération d'habitat importante, contrairement au barbeau. Cette observation s'explique par les préférences de ces deux espèces. Les ouvrages de régulation modélisés étant uniquement présents sur des cours d'eau importants à forts débits, seuls les barbeaux sont impactés.

Il est également important de noter un effet de non linéarité. En effet, la proportion d'arcs touchés par une forte altération d'habitat pour le barbeau peut atteindre des valeurs plus importantes que la proportion d'arcs présentant une importante altération hydrologique.

Ce scénario ne présente pas d'arcs apparus ou supprimés.

Enfin, sur l'ensemble du territoire, la répartition de fortes modifications (hydrologiques et d'habitat) semble également cohérente et correspond à des cours d'eau importants (la Durance, l'Isère ou le Drac par exemple), sur des portions où sont implantés des ouvrages de régulation de taille importante. (Figure 21).

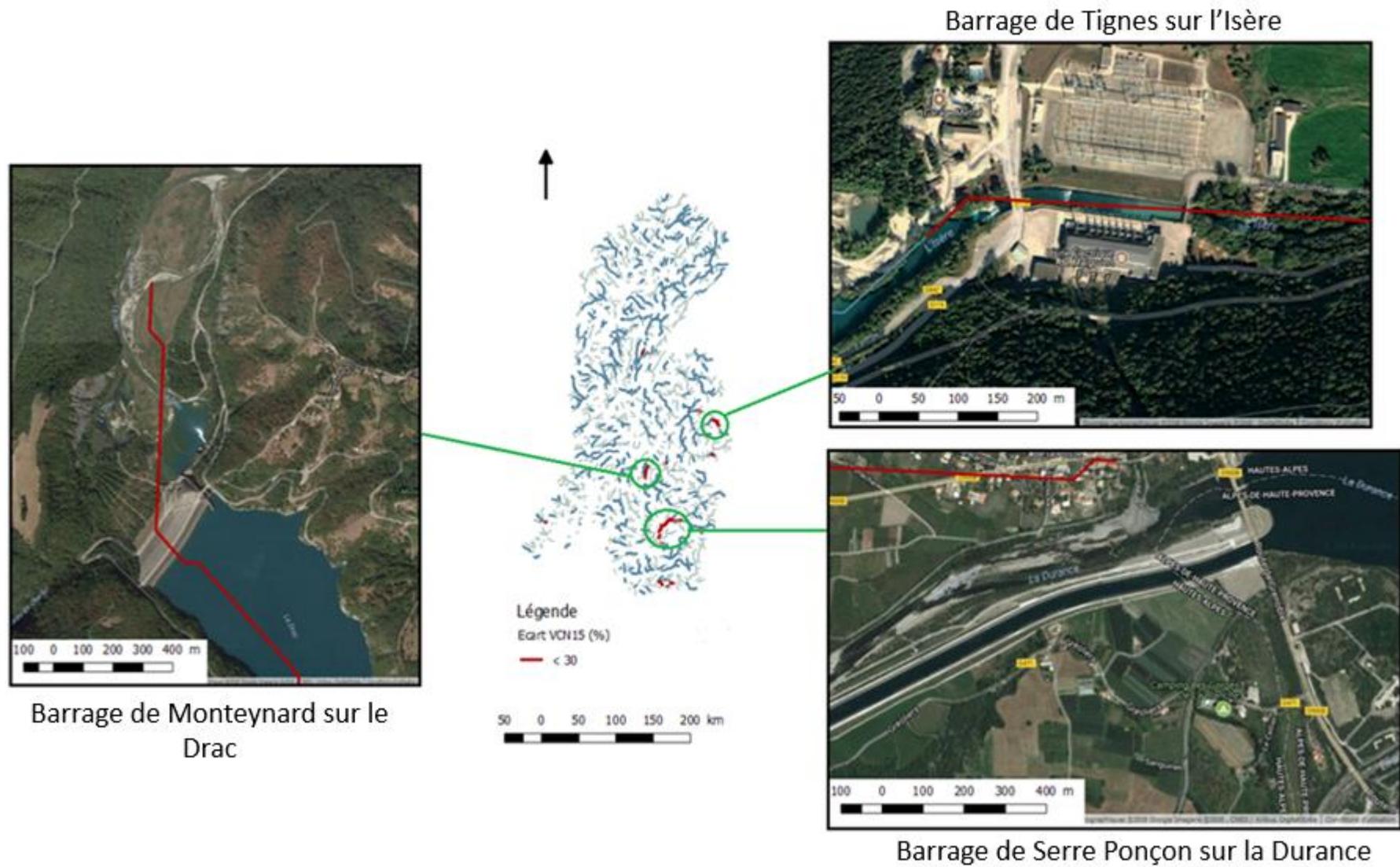


Figure 22: Carte des altérations hydrologiques supérieures à 30% liées à l'anthropisation du bassin, identification des cours d'eau et des ouvrages de la Durance, de l'Isère et de la Drac

## 2. Impact pur du changement climatique (2075-2100)

Les cartes représentant les écarts pour la température et la pluie pour les scénarios 8.5 et 2.6 sont présentées en annexes 14 et 15.

Cette partie porte uniquement sur l'impact du changement climatique. Les résultats sont explicités pour le bassin du Rhône naturalisé (sans ouvrages de régulation et irrigation). Ce choix permet d'appréhender des résultats de manière plus fluide, les ouvrages de régulation pouvant présenter des effets de seuils dans certains cas.

Une chronique journalière de 70 ans (2030-2100) a alors été étudiée sur le modèle J2000 dans le but d'obtenir les débits sur l'ensemble du bassin sur la période 2075-2100.

De la même manière que pour l'étude précédente, ces chroniques ont été étudiées dans le but d'obtenir les débits caractéristiques nécessaires à l'étude (module, Q50, Q95, VCN15).

L'influence du changement climatique sur les débits a alors pu être visualisée (Figure 23) et traduite en modification d'habitat (Figure 24). Dans le corps du rapport, seul les modifications d'habitat pour le scénario 8.5 seront étudiées. Les modifications pour le scénario 2.6 sont explicitées en annexes 16.

Les altérations les plus importantes sont encore une fois observées pour les VCN15, correspondant aux débits d'étiage.

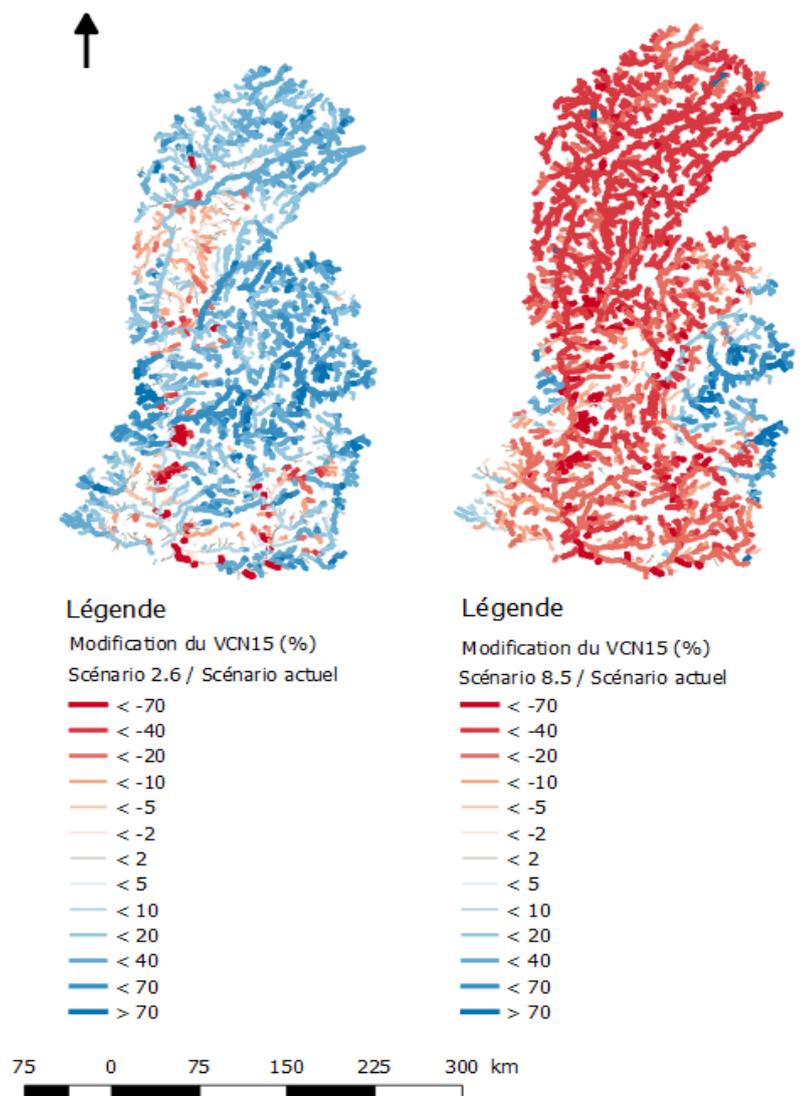


Figure 23: Modifications du VCN15 liées au changement climatique pour les scénarios 2.6 et 8.5 sur le bassin du Rhône naturalisé

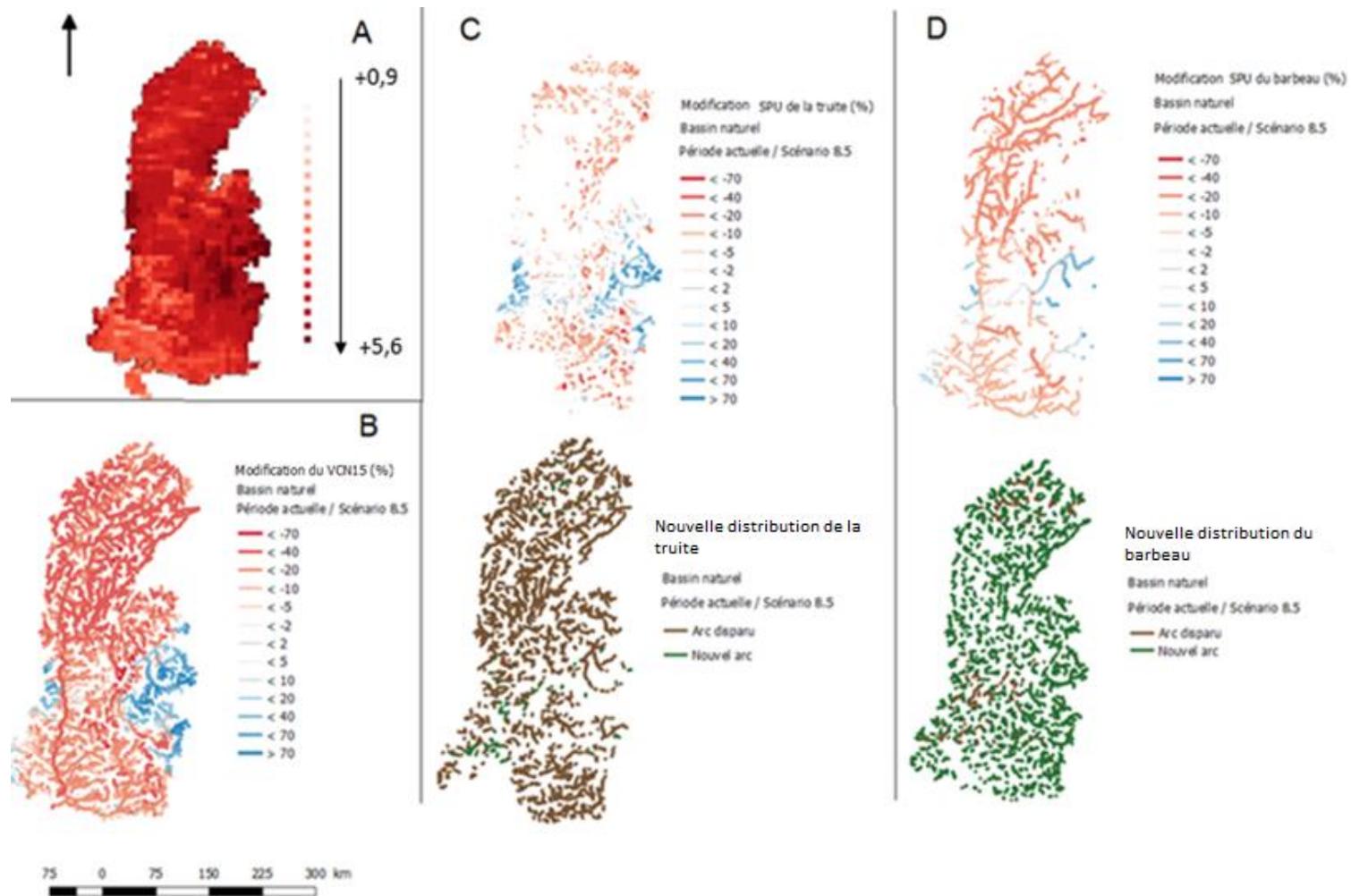


Figure 24: A: Ecart brut de température (°C) pour le scénario 8.5 - B: Modifications du VCN15 (%) - C: Modifications de la SPU de la truite (%) et de la nouvelle distribution - D: Modifications de la SPU du barbeau (%) et de la nouvelle distribution

Il est important de signaler que le modèle de distribution d'espèces a été utilisé en prédictif. Ce fonctionnement est détaillé dans la partie 4. Incertitudes. Les résultats concernant l'étude du changement climatique sont alors soumis à des d'incertitudes très importantes.

De fortes augmentations de températures sont à signaler pour ce scénario 8.5, mis à part sur la partie sud-ouest du bassin versant où l'écart apparaît plus modéré (Figure 24. A). L'ensemble des sept sous-bassins présente d'importantes modifications hydrologiques et d'habitat (tableau 5).

Les proportions exprimées ci-dessous concernant les altérations d'habitat et les nouvelles distributions sont calculées par rapport à la configuration du contexte de référence (ici le contexte actuel).

	Doubs	Durance	Gard	Haut Rhône	Isère Drome	Rhône Moyen	Saône
<b>Longueur totale (km)</b>	1 362	2 787	1 542	1 962	2 334	1 127	3 500
<b>Cours d'eau à truite (%)</b>	77.8	70.1	53.6	78.8	67.2	78.1	78.8
<b>Cours d'eau à barbeau (%)</b>	40.5	45.7	47.3	36.6	34.9	45.7	51.6
<b>Cours d'eau ayant une modification hydrologique (%) &lt; -30 (%)</b>	<b>95.3</b>	<b>26.2</b>	<b>5.07</b>	<b>79.2</b>	<b>25.1</b>	51.9	<b>92.4</b>
<b>Cours d'eau à truite ayant une modification d'habitat (%) &lt; -30 (%)</b>	0.79	5.03	0	0.72	0.97	0	0.13
<b>Cours d'eau à barbeau ayant une modification d'habitat (%) &lt; -30 (%)</b>	<b>50.9</b>	0.80	0	<b>37.0</b>	0	0	13.6

*Tableau 5: Tableau récapitulatif des altérations hydrologiques et d'habitat sur l'ensemble du bassin du Rhône concernant l'impact du changement climatique (scénario 8.5)*

Les modifications hydrologiques importantes apparaissent très répandues sur une grande partie du bassin du Rhône (plus de 90% de la longueur du réseau dans les sous-bassins du Doubs et de la Saône) exceptées dans les parties montagneuses (moins de 30% dans les sous-bassins Isère-Drôme avec la présence du massif alpin et 5.07% dans le sous-bassin du Gard avec la présence des monts d'Ardèche) (Figure 24. B). Cette répartition peut s'expliquer par la fonte des neiges, apportant de l'eau pendant la période sèche.

Cette répartition des altérations hydrologiques se retrouve dans les altérations d'habitat pour les deux espèces considérées. Les zones montagneuses (sous-bassins du Gard et Isère-Drome) présentent des proportions d'arcs subissant des altérations d'habitat importantes très faibles (0% dans le sous-bassin du Gard et moins de 1% dans le sous-bassin Isère-Drome). Au contraire, les sous-bassins présentant des altérations hydrologiques importantes de manière répandue (sous-bassins du Doubs, Haut-Rhône et Saône) présentent une forte proportion d'arcs subissant des altérations d'habitat importantes (50.9% dans le Doubs et 37% dans le Haut-Rhône pour le barbeau).

Ces modifications de température et de débits ont un impact direct sur les habitats de poissons (Chapitre 1. b. Modèles écologiques : Modèles de distribution et modèles d'habitat) et se traduisent par de fortes modifications d'habitat (Figure 24 C et D).

Pour les deux espèces considérées, la modification de la zone de présence semble majoritaire (création ou disparition d'arcs) (tableau 6).

	<b>Doubs</b>	<b>Durance</b>	<b>Gard</b>	<b>Haut Rhône</b>	<b>Isère Drome</b>	<b>Rhône Moyen</b>	<b>Saône</b>
<b>Distance totale (km)</b>	1 362	2 787	1 542	1 962	2 334	1 127	3 500
<b>Nouveaux arcs pour la truite (%)</b>	0.45	0.97	5.44	0	5.52	1.46	1.48
<b>Arcs disparus pour la truite (%)</b>	<b>70.4</b>	<b>56.2</b>	<b>46.3</b>	<b>70.7</b>	<b>35.4</b>	<b>70.9</b>	<b>80.2</b>
<b>Nouveaux arcs pour le barbeau (%)</b>	<b>126.9</b>	<b>87.7</b>	<b>2.15</b>	<b>123.7</b>	<b>108.2</b>	<b>85.6</b>	<b>65.8</b>
<b>Arcs disparus pour le barbeau (%)</b>	5.23	1.40	7.24	0	20.0	4.34	9.50

*Tableau 6: Tableau récapitulatif des nouvelles distributions de la truite et du barbeau liées au changement climatique (scénario 8.5)*

Cela peut être expliqué par le calcul de la SPU, étant effectué dans le modèle uniquement si le seuil de probabilité de présence est dépassé. D'aussi importantes perturbations (températures, pluies, ETP) peuvent amener au dépassement de ces seuils.

Les truites semblent être impactées de manière importante par l'augmentation de la température et des altérations de débits très répandues (perte plus modérée dans les sous-bassins du Gard et Isère-Drome liée à la présence de massifs montagneux).

Il est également possible de remarquer une remontée de la présence des barbeaux dans les têtes de bassins versants, subissant des altérations hydrologiques plus faibles.

### 3. Impact de l'anthropisation – Période future (2075-2100)

De la même manière que dans le chapitre 1, il a été possible de générer les chroniques de débits sur l'ensemble du bassin naturalisé (sans prendre en compte les ouvrages de régulation du débit et l'irrigation) dans un cadre prospectif. L'impact de l'anthropisation du bassin a alors pu être étudiée dans le futur et les modifications du VCN15 (%) ont pu être visualisées pour les scénarios 2.6 et 8.5. (Figure 25)

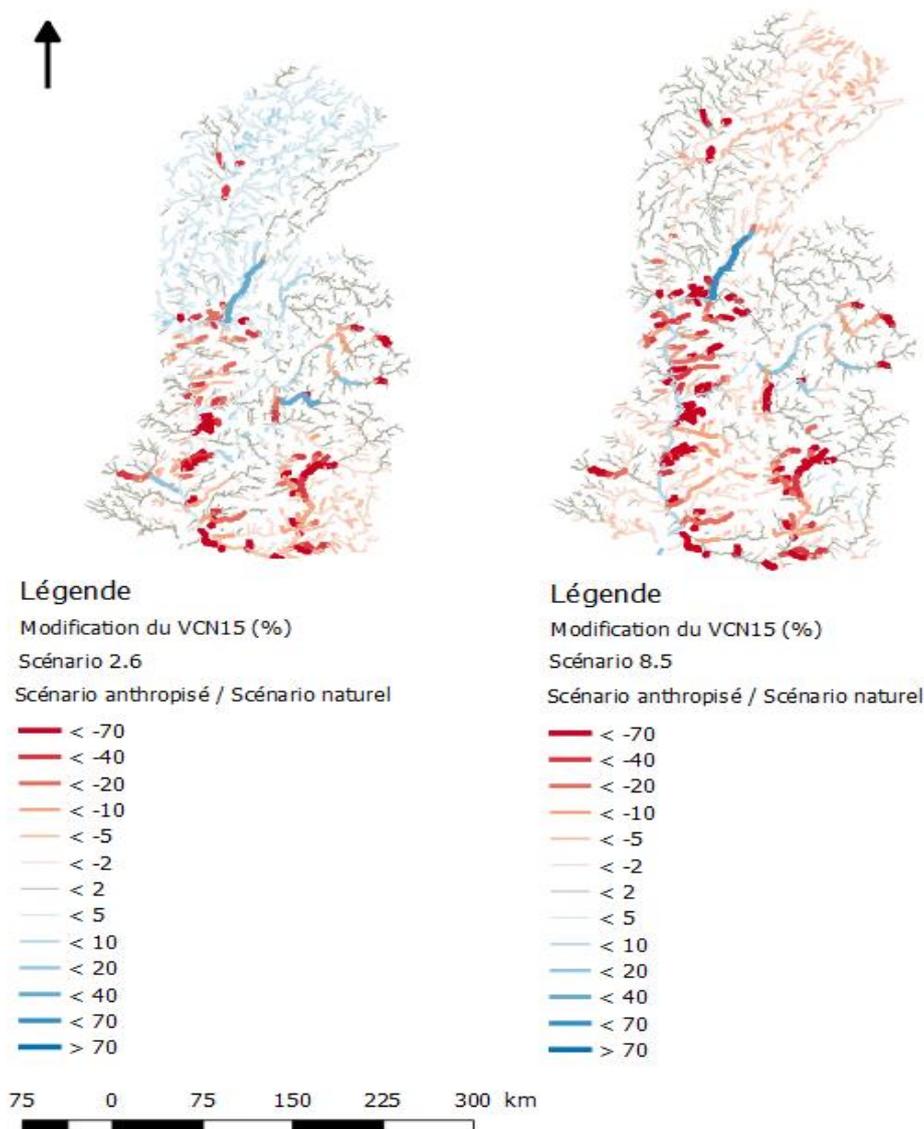


Figure 25: Modifications du VCN15 liées à l'anthropisation du bassin pour les scénarios 2.6 et 8.5

De plus fortes modifications hydrologiques sont à signaler dans le futur, pour les deux scénarios, en particulier sur les tronçons liés à un débit important. Le bassin apparaît également plus sensible à l'anthropisation (ouvrages de régulation et irrigation), notamment avec la présence de modifications hydrauliques non nulles sur des arcs distants d'ouvrages de régulation.

La figure 26 traduit ces modifications de VCN15 en modifications d'habitat pour la truite et le barbeau ainsi que leur nouvelle distribution pour le scénario 8.5.

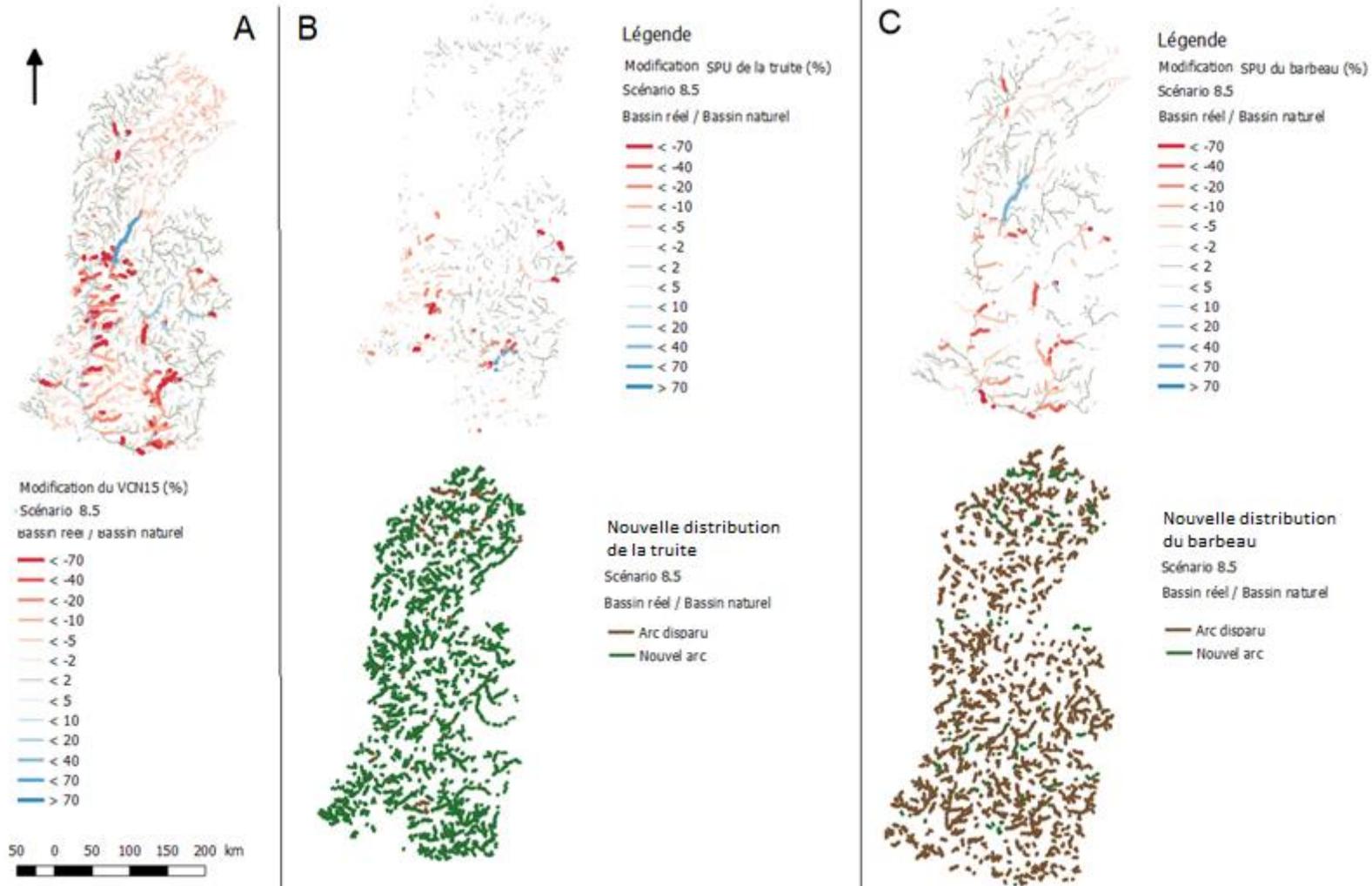


Figure 26: A: Modifications du VCN15 (%) liées à l'anthropisation du bassin dans le futur (scénario 8.5) - B: Modifications de la SPU de la truite (%) et de la nouvelle distribution- C: Modifications de la SPU du barbeau (%) et de la nouvelle distribution

Les cartes représentant l'impact de l'anthropisation dans le cadre du scénario 2.6 sont explicitées en annexes 17.

Les sous-bassins du Gard, de la Durance, Isère-Drôme et Rhône Moyen présentent visuellement de nombreux arcs subissant des altérations hydrologiques importantes (< -30%). L'étude statistique a alors portée sur ces sous-bassins (Tableau 7).

Le contexte de référence est ici le bassin du Rhône naturalisé dans le cadre du scénario 8.5

	<b>Durance</b>	<b>Gard</b>	<b>Isère-Drôme</b>	<b>Rhône Moyen</b>
<b>Distance totale (km)</b>	2 787	1 542	2 334	1 127
<b>Cours d'eau à truite (%)</b>	30.9	31.6	47.9	24.0
<b>Cours d'eau à barbeau (%)</b>	85.4	74.0	65.2	83.4
<b>Cours d'eau ayant une modification hydrologique (%) &lt; -30 (%)</b>	<b>9.88</b>	<b>3.10</b>	<b>6.70</b>	<b>19.6</b>
<b>Cours d'eau à truite ayant une modification d'habitat (%) &lt; -30 (%)</b>	1.75	0	3.73	1.57
<b>Cours d'eau à barbeau ayant une modification d'habitat (%) &lt; -30 (%)</b>	2.27	0	4.50	1.95

*Tableau 7 : Tableau récapitulatif des altérations hydrologiques et d'habitat sur l'ensemble du bassin du Rhône concernant l'impact de l'anthropisation (ouvrages de régulation et irrigation) pour le scénario 8.5*

Les altérations hydrologiques liées à l'anthropisation du bassin sont plus répandues dans le futur dans les 3 sous-bassins communs à l'étude (Durance, Gard et Isère-Drôme) (tableau 8).

	<b>Durance</b>	<b>Gard</b>	<b>Isère-Drôme</b>
<b>Cours d'eau ayant une modification hydrologique (%) &lt; -30 (%) – Période actuelle</b>	4.16	2.87	2.58
<b>Cours d'eau ayant une modification hydrologique (%) &lt; -30 (%) – Scénario 8.5</b>	9.88	3.10	6.70

*Tableau 8 : Comparaison de la proportion des cours d'eau (en % de longueur) subissant d'importantes altérations hydrologiques liées à l'anthropisation du bassin Période actuelle / Scénario 8.5*

Le bassin apparaît alors significativement plus sensible à l'anthropisation du bassin, notamment avec l'apparition d'une forte proportion d'arcs subissant une altération hydrologique importante dans le sous-bassin du Rhône-Moyen, malgré l'absence d'importants ouvrages de régulation mais soumis à une irrigation importante.

De la même manière que pour la période actuelle, les altérations hydrologiques restent relativement restreintes aux ouvrages de régulation (proportions inférieures à 20%). Cependant, les cours d'eau à truite sont également touchés dans les sous-bassins de la Durance et du Gard.

De la même manière, la très grande majorité du bassin est occupée par des modifications de zone de présence pour les deux espèces (création ou disparition d'arcs) (Tableau 9).

	<b>Durance</b>	<b>Gard</b>	<b>Isère-Drôme</b>	<b>Rhône Moyen</b>
<b>Distance totale (km)</b>	2 787	1 542	2 334	1 127
<b>Nouveaux arcs pour la truite (%)</b>	<b>135</b>	<b>122</b>	<b>54.3</b>	<b>218.2</b>
<b>Arcs disparus pour la truite (%)</b>	30.0	3.96	2.89	5.45
<b>Nouveaux arcs pour le barbeau (%)</b>	1.61	2.75	5.93	0.90
<b>Arcs disparus pour le barbeau (%)</b>	<b>45.2</b>	<b>52.0</b>	<b>62.9</b>	<b>61.9</b>

*Tableau 9: Tableau récapitulatif des nouvelles distributions de la truite et du barbeau liées à l'anthropisation du bassin (scénario 8.5)*

Contrairement à l'étude concernant l'effet pur du changement climatique, l'anthropisation du bassin dans le cadre du scénario 8.5 est marquée par une apparition très importante d'arcs à truite et au contraire une forte disparition d'arcs à barbeau.

Il est important ici de signaler que les proportions présentées dans cette partie sont exprimées par rapport au contexte de référence, à savoir le bassin du Rhône naturalisé dans le cadre du scénario 8.5, présenté dans la partie précédente. Cette partie tient donc part des cours d'eau apparus et disparus pour les deux espèces dans le cadre de ce scénario (forte perte d'arcs pour la truite et forte apparition pour le barbeau), la nouvelle distribution des espèces est alors soumise à une très grande incertitude. La proportion d'arc à truite a par exemple été calculée à partir d'un nombre d'arcs très faible.

## 4. Incertitudes

Dans cette étude, les incertitudes sont dans un premier temps liées aux estimations concernant les débits (tous sont issues de simulations à partir du modèle J2000), ainsi qu'à la transposition du réseau hydrographique d'étude (du réseau associé au modèle J2000 au réseau hydrographique théorique) et également aux incertitudes concernant le réseau hydrographique lui-même (Annexe 4).

Les incertitudes concernant les faibles débits (par exemple  $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ) peuvent atteindre +/- 100% (Lamouroux et *al.*, 2013).

Le choix de simuler les étiages par le VCN15 est également discutable (le Q95 avait été utilisé dans l'étude précédente (Miguel et *al.*, 2016) pour traduire les altérations hydrauliques.) D'autres débits d'étiages existent également et auraient pu être utilisés, comme le débit moyen mensuel minimum de l'année de période de retour 5 ans (QMNA5), présenté comme le débit de référence pour les étiages par la loi sur l'eau de 1992.

La transposition des données de débits aux caractéristiques hydrauliques des tronçons est également une source d'incertitudes, les formules étant issues d'études directement sur le terrain (Lamouroux et *al.*, 2010).

Enfin, les modèles d'habitat apparaissent comme des simplifications du cycle de vie des espèces. En effet, les individus utilisent une grande variété d'habitat et plusieurs combinaisons de variables physiques au cours de leur vie (substrat, vitesse), les modèles de préférence sont alors une simplification de ces comportements complexes (figure 27).

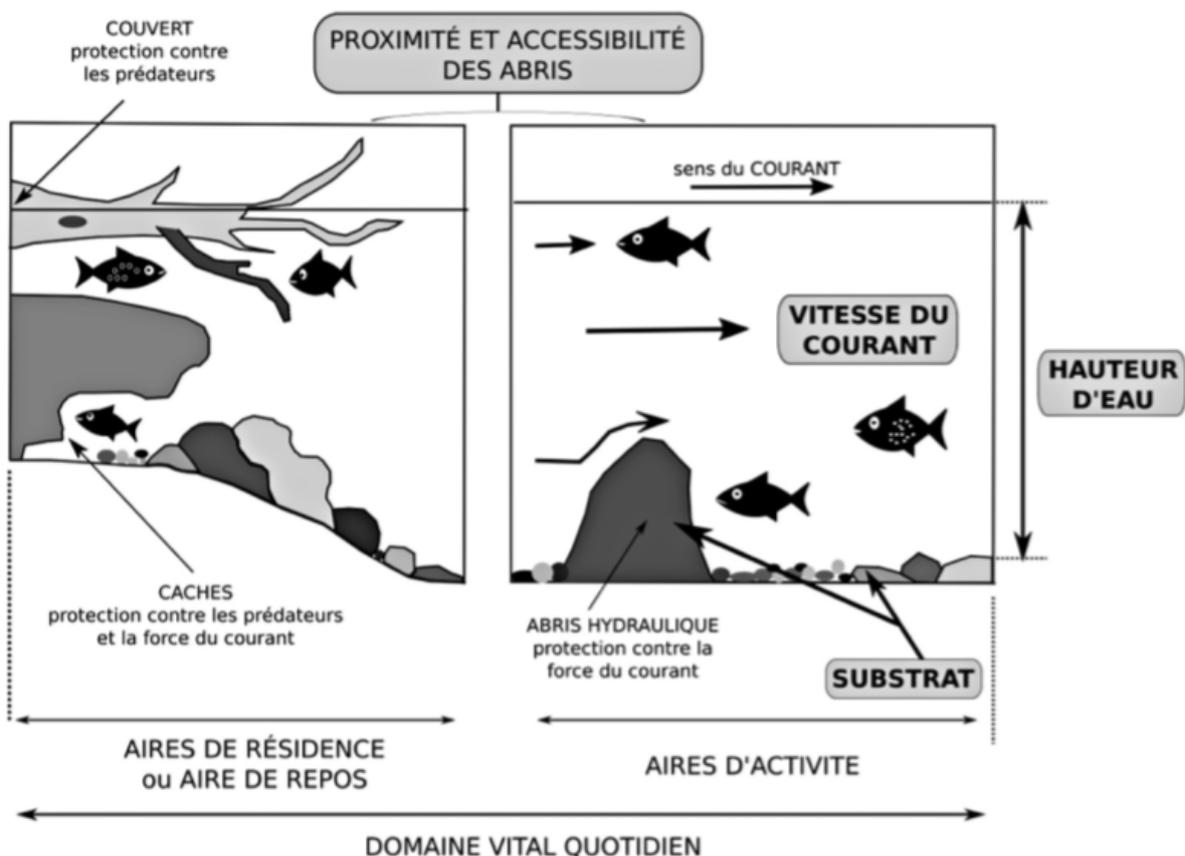


Figure 27: Illustration de l'habitat physique quotidien (d'après Thévenet, 1998)

La simulation des débits naturalisés peut également apparaître incomplète. Seuls les barrages de taille importante sont implantés dans le modèle J2000. De très nombreux ouvrages de régulation du débit n'apparaissent pas dans l'étude (seuils, déversoirs), pouvant avoir un impact significatif pour les poissons.

De plus, pour certains usages comme la gestion des éclusées hydroélectriques, la variation des débits peut se faire à une échelle très rapide (variations infra-journalières), la simulation des ouvrages à l'aide de débits moyennés sur une chronique aussi longue (27 ans) apparaît alors comme une importante simplification.

D'autre part, les données concernant l'irrigation ont été obtenues à partir de recensements et présentent une part de simplifications (uniquement prise en compte de la culture dominante de la parcelle par exemple).

La succession de modèles (hydrologique, hydraulique et écologique) entraîne un cumul d'incertitudes, pouvant être très fortes à l'échelle du tronçon.

Les incertitudes concernant les modifications d'habitat hydrologique peuvent en effet être très importantes à cette échelle mais sont interprétables à l'échelle d'un territoire considéré (comme les sous-bassins DCE administratifs). En effet, certains tronçons présentent des modifications très importantes pouvant être liées au calcul des modifications hydrauliques ou d'habitat (deux valeurs très faibles peuvent traduire un écart très important mais ne représentant pas de variations représentatives) (figure 28).

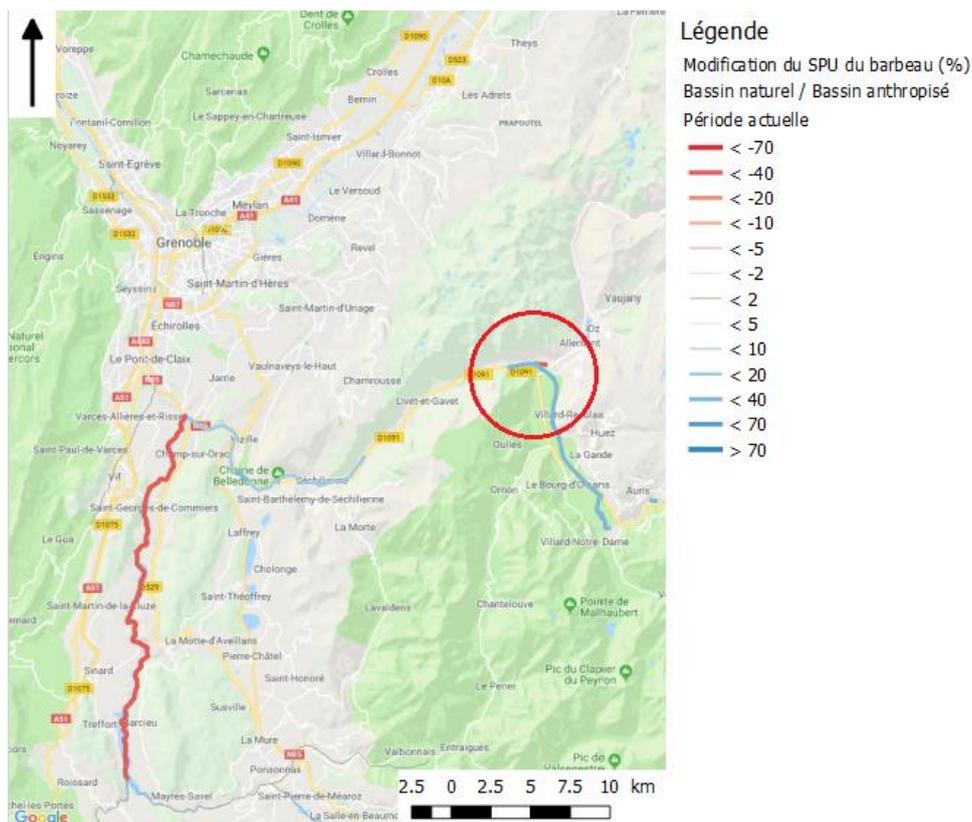


Figure 28: Exemple d'incertitudes à l'échelle du tronçon

Cette étude a également eu une dimension prospective apportant naturellement des incertitudes supplémentaires (simulation des chroniques de température, de pluies et d'évapotranspiration).

Enfin, le modèle de probabilité de présence a été utilisé en prédictif. En effet, ce modèle a été fait à partir d'observations sur le terrain et utilise plusieurs variables d'entrée, notamment les températures moyennes de janvier et juillet, issues du modèle AURELHY (Météo France) sur une chronique de 1960 à 1990 et associées au RHT.

Cependant, pour le modèle de probabilité de présence, les scénarios de changement climatique étudiés dans cette étude l'ont été à partir du RHT et de cette chronique de température, et non à partir d'une nouvelle chronique comme pour le modèle hydrologique. Les résultats sont alors soumis à une très forte incertitude.

## Conclusion

Le couplage de différents modèles (hydrologique, hydraulique et écologique) a permis d'estimer les impacts liés aux ouvrages de régulation et à l'irrigation sur les populations piscicoles à une échelle très large. Classiquement liée à l'échelle du tronçon, cette estimation simplifiée des altérations d'habitat permet de mieux appréhender les nouveaux aspects réglementaires.

Il est cependant important d'interpréter les résultats à une échelle importante comme un sous bassin ou un territoire DCE par exemple, les incertitudes cumulées pouvant être très importantes à une échelle plus restreinte comme celle du tronçon.

Cette étude a permis de mettre en lumière l'impact limité spatialement des ouvrages de régulation de débits. Cependant, cet impact apparaît non négligeable pour les espèces associées aux cours d'eau importants en termes de débit comme le barbeau. L'irrigation semble avoir un rôle marginal dans les altérations d'habitat hydraulique.

Ce projet a permis d'étudier l'impact de l'anthropisation du bassin du Rhône actuellement et également dans un cadre prospectif (fin du XXI<sup>e</sup> siècle) pour deux scénarios climatiques (2.6 et 8.5) ainsi que l'impact direct du changement climatique (modification de la température, de la pluviométrie et de l'évapotranspiration) sur le bassin anthropisé.

Les résultats apparaissent cohérents. Cependant, cette étude a impliqué le fonctionnement du modèle de distribution d'espèces en prédictif, cet usage étant non testé, il paraît plus cohérent de parler de risques que de réelles prévisions, notamment dans les nouvelles distributions des espèces sur le bassin.

Il est toutefois important de souligner les conséquences très importantes du changement climatique sur les habitats de poissons et sur la sensibilité hydraulique du bassin, en particulier pour le scénario pessimiste 8.5.

Enfin, les modifications des caractéristiques hydrauliques d'un cours d'eau (hauteur, largeur mouillée) ne représentent toutefois qu'une partie, non nécessairement limitante, des modifications subies par un organisme aquatique (modifications physico chimiques par exemple).

# Annexes

The screenshot displays the JAMS GUI Builder interface. On the left, a tree view shows the project structure for 'J2K\_rhone', including components like ParameterInput, Initialization, TimeLoop, ExecutionInfo, CatchmentResetter, TSInput, HRULoop, Regionalization, IrrigationInit, IrrigationContext\_1, VariableInit\_1, IrrigationApplication, IrrigationApplicationAsp, IrrigationApplicationDrip, IrrigationApplicationSurf, CropCoefficient\_1, CalcRainSnowParts\_IRSTEA, J2KProcessInterception3\_1, J2KProcessSnow\_IRSTEA, J2KProcessLumpedSoilWater\_Tc, J2KProcessGroundwater\_satRG, HRU2HRURouting, HRU2ReachRouting, SpatialWeightedSumAggregator, and IrrigationContext\_2. The main area shows the configuration for the selected 'J2K\_rhone' component.

**Component configuration GUI Builder**

**Name:** J2K\_rhone

**Type:** jams.model.JAMSModel

**Context attributes (local)**

Name	Type	Value
data_caching	Integer	2
snow_trans	Double	3
snow_trs	Double	2
timeInterval	TimeInterval	1985-01-01 07:30 2012-12-31 07:30 6 1

**Workspace:** [Empty field]

**Author:** Francois Tilmant

**Creation date:** 3 avr. 2013 00:00

**Description:** The standard J2K hydrological model

**Help Base URL:** <http://jams.uni-jena.de/jamswiki>

*Annexe 1: Interface de JAMS*

<b>modèle intégré dans ESTIMKART (calcul sur chaque arc)</b>	<b>Paramètres (ctes modifiables)</b>
<i>coefficients de géométrie hydraulique</i>	
$a_d = \exp(ad0 + adbv * \ln(\text{surfBV}) + adslo * \sqrt{\text{SLO}} + adordr * \text{ordre})$	ad0 = 2.122 adbv = 0 adslo = - 0.076 adordr = 0
$b_d = bd0 + bdq * \ln(\bar{Q}) + bdbv * \ln(\text{surfBV}) + bdslo * \sqrt{\text{SLO}} + bdordr * \text{ordre}$	bd0 = 0.475 bdq = 0 bdbv = 0 bdslo = 0 bdordr = 0
$b = b0 + bq * \ln(\bar{Q}) + bbv * \ln(\text{surfBV}) + bslo * \sqrt{\text{SLO}} + bordr * \text{ordre}$	b0 = 0.125 bq = 0 bbv = 0 bslo = 0 bordr = 0
$c_d = \exp(cd0 + cdbv * \ln(\text{surfBV}) + cdslo * \sqrt{\text{SLO}} + cdordr * \text{ordre})$	cd0 = - 0.966 cdbv = 0 cdslo = - 0.058 cdordr = 0
$f_d = fd0 + fdq * \ln(\bar{Q}) + fdbv * \ln(\text{surfBV}) + fdslo * \sqrt{\text{SLO}} + fdordr * \text{ordre}$	fd0 = 0.298 fdq = 0 fdbv = 0 fdslo = 0 fdordr = 0
$f = f0 + fq * \ln(\bar{Q}) + fbv * \ln(\text{surfBV}) + fslo * \sqrt{\text{SLO}} + fordr * \text{ordre}$	f0 = 0.302 fq = 0 fbv = 0 fslo = 0 fordr = 0
<b>grandeurs hydrauliques</b>	
$\bar{L} = a_d \bar{Q}^{b_d}$	
$\bar{H} = c_d \bar{Q}^{f_d}$	

[Annexe 2: Détermination des coefficients de géométrie hydraulique](#)

[Source : Lamouroux, 2010](#)

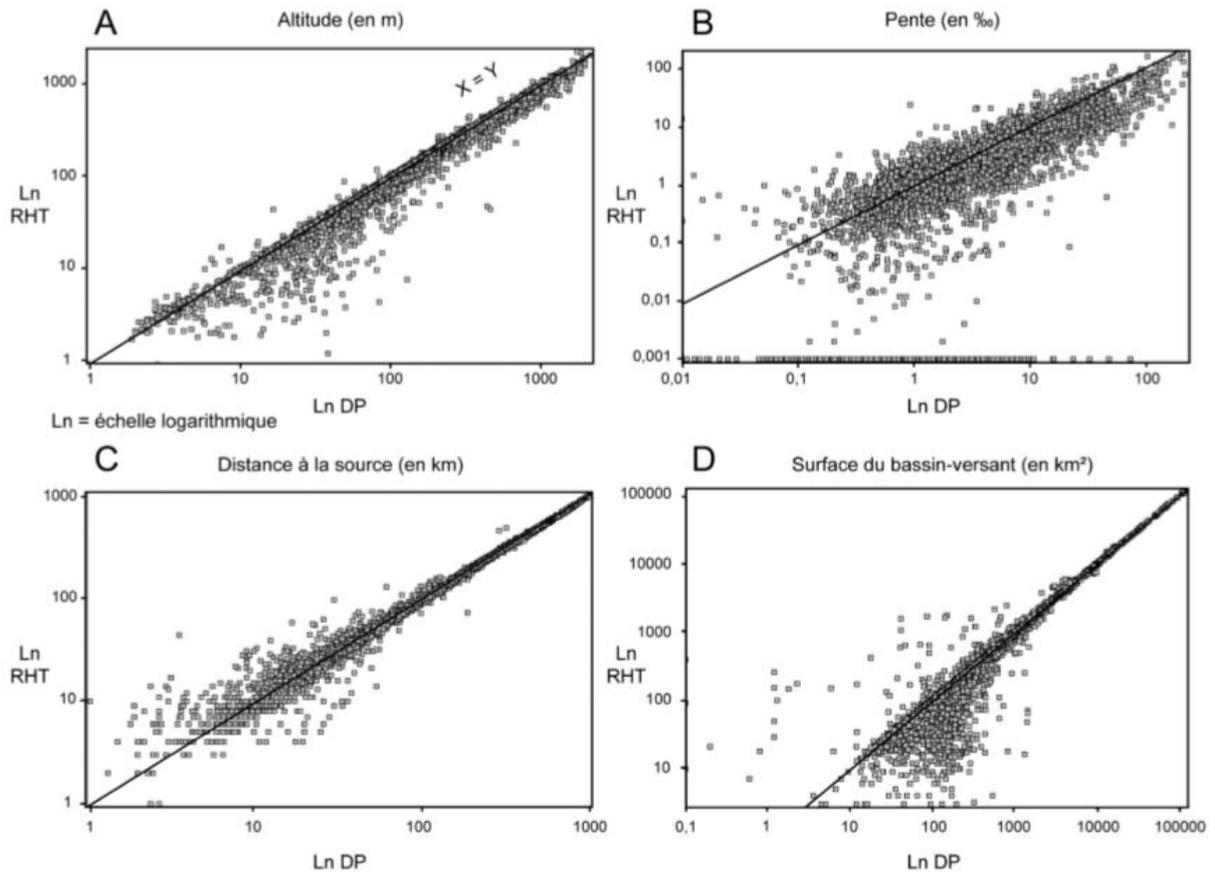
ESP	Intercept	Correction sur intercept suivant bassin								Coefficients des modèles									
		nord	sein	manc	atla	loir	garo	rhon	medi	cV	cV^2	cTV	cTV^2	cTA	cTA^2	cA	cA^2	cG	cG^2
ABL	-65.8315	-0.3877	-1.8736	0.3677	0.0000	0.6268	-0.4345	-0.3696	-2.1287	0.0000	0.0000	0.1222	0.0000	6.8521	-0.2017	2.5558	-0.3873	-2.0446	0.0000
ANG	9.7428	-2.4824	-3.6886	-0.3957	0.0000	-2.3304	-1.8987	-2.9428	-0.4382	0.0000	-0.2391	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-1.6141	0.0000	-0.4091	0.0000
BAF	-25.7366	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.6012	0.0000	1.2835	-0.0218	0.0000	0.0126	0.6324	0.0000	-1.9185	-0.2392
BAM	-16.5079	1.4034	1.1091	0.7908	0.0000	0.7767	8.8232	9.9618	12.2506	0.0000	0.0000	0.1885	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.3480
BLN	-36.0590	0.4374	-0.2209	0.8884	0.0000	0.1717	0.0588	13.4636	11.2158	0.0000	-0.2603	1.9595	-0.0402	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.7134	0.0000
BOU	-2.8481	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.6125	0.0000	0.0000	-0.0039	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-1.9111	-0.2308
BRB	-2.0125	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.4278	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0595	-1.2847	0.0000
BRO	-10.9132	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.6421	0.0000	-0.1569	0.0000	0.2331	0.0000	5.1173	-0.6639	-0.4933	0.0000
CAS	-1.3359	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.5779	0.0000	0.0000	0.1186
CCO	-20.0934	9.5898	9.5190	1.8567	0.0000	9.8274	7.8334	8.5576	7.7224	-0.2810	0.0000	0.3059	0.0000	0.0000	0.0122	0.0000	-0.0748	0.0000	0.1058
CHA	-10.4795	0.1401	0.8229	1.0272	0.0000	0.6566	0.1949	0.2431	-1.0891	0.0000	-0.0952	0.5211	-0.0177	0.0000	0.0000	4.1059	-0.4791	0.2092	-0.1988
CHE	-41.1173	0.5515	0.2511	-0.2474	0.0000	1.1551	0.5057	1.5180	1.6519	0.0000	-0.2971	0.0948	0.0000	4.0268	-0.1225	3.0234	-0.3732	-1.0779	0.1421
EPI	-23.8069	10.3325	8.7490	6.0910	0.0000	7.3899	6.8660	9.4706	1.1321	0.0000	-0.4427	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7.5978	-0.9819	0.3552	0.0000
EPT	-8.4907	0.1156	2.5520	-1.0283	0.0000	2.2941	0.6293	-5.2176	-6.4245	-0.4288	-1.0499	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4.2130	-0.6233	0.5329	-0.2639
GAR	-7.4054	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.5783	-0.1991	0.0000	0.0000	0.3278	0.0000	1.7728	-0.2831	-0.7350	0.1795
GOU	-1.6140	0.5447	0.2141	-1.0529	0.0000	1.1369	1.2091	0.1598	-0.0033	-0.3584	-0.2375	0.0000	0.0037	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.8991	-0.1702
GRE	-105.3557	11.8403	8.3341	9.6103	0.0000	10.2638	8.3710	3.5267	0.7453	-0.5106	0.0000	0.0000	0.0000	11.7586	-0.3606	0.0000	-0.1352	-1.4505	-0.2793

ESP	Intercept	Correction sur intercept suivant bassin								Coefficients des modèles									
		nord	sein	manc	atla	loir	garo	rhon	medi	cV	cV^2	cTV	cTV^2	cTA	cTA^2	cA	cA^2	cG	cG^2
HOT	-124.3824	7.7572	7.5763	1.5291	0.0000	8.7025	4.7515	8.1168	6.7740	-0.9399	0.0000	0.0000	0.0000	13.7673	-0.4147	0.0000	0.0000	-1.6986	-0.2559
LOF	-11.9671	-0.8217	0.6007	0.3815	0.0000	1.2174	-0.5550	-0.1730	-3.0129	-0.4583	-0.2351	0.1397	0.0000	0.0000	0.0000	4.1020	-0.3811	-0.1854	-0.2454
LOT	-6.8531	4.2810	5.9684	-2.8928	0.0000	9.4509	9.1155	6.3454	2.9226	0.0000	-0.7038	0.0000	-0.0180	0.0000	0.0168	3.1815	-0.5932	0.0000	0.0000
LPP	0.9374	0.1699	0.1489	0.1149	0.0000	0.3145	-0.8440	-1.1103	-7.7997	0.0000	-0.4969	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0060	0.0000	0.0000	0.2849	-0.1670
OBR	-105.1076	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	11.4730	-0.3186	0.0000	0.0000	-1.2507	-0.3320
PCH	-7.3326	-8.3928	-0.2637	-6.3310	0.0000	1.4129	0.0481	0.6048	-7.3960	-0.6591	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0249	0.0000	-0.1048	0.0000	0.0000
PER	-28.7419	3.7191	2.9022	2.7696	0.0000	3.0311	2.0707	3.1050	0.2192	-0.5497	0.0000	0.0000	0.0000	3.3833	-0.1037	-0.5884	0.0000	-0.7574	0.0000
PES	-2.0482	-0.6812	-1.4756	-7.8945	0.0000	1.4002	0.8112	0.3171	1.4463	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0015	0.0000	0.0156	0.0000	-0.1492	-0.4316	0.0000
ROT	-14.1178	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0060	0.2636	0.0000	5.3245	-0.6722	-0.6009	0.0000
SAN	-7.0623	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.6128	-0.3029	-2.0275	-0.1421
SAT	-10.8659	-10.0329	-11.5669	-1.7659	0.0000	-2.0344	0.7273	-8.9436	-7.5374	0.9261	0.4470	3.2323	-0.0807	-3.8642	0.1223	4.2993	-0.6256	-1.1263	-0.1605
SPI	-18.9686	10.2210	9.8177	2.0990	0.0000	11.8308	-0.5192	10.4398	-0.0577	0.0000	-0.4822	0.0000	0.0044	0.0000	0.0164	0.0000	0.0000	-1.8499	-0.3750
TAN	-2.3068	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.7570	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.5862	0.0000
TOX	-9.1176	-6.6853	-7.7939	-7.0108	0.0000	0.2729	0.8098	1.0293	-2.2571	0.0000	0.0000	0.0000	0.0101	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-1.8322	-0.5909
TRF	3.7755	-3.3833	-2.3155	0.0809	0.0000	-0.3864	-0.9222	-1.2148	-1.4478	0.3924	0.0000	0.0000	-0.0062	0.0000	0.0000	0.0000	0.1060	0.5386	-0.1263
VAI	-5.1832	-1.9341	-0.8967	-0.9206	0.0000	0.7339	-0.2511	-0.8686	-0.7915	0.0000	-0.3793	0.0617	0.0000	0.0000	0.0000	2.3638	-0.2253	-0.2037	-0.2246
VAN	-2.6023	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.7311	-0.4341	0.0000	0.0000	0.0000	0.0065	0.0000	0.0000	-1.3619	-0.2580

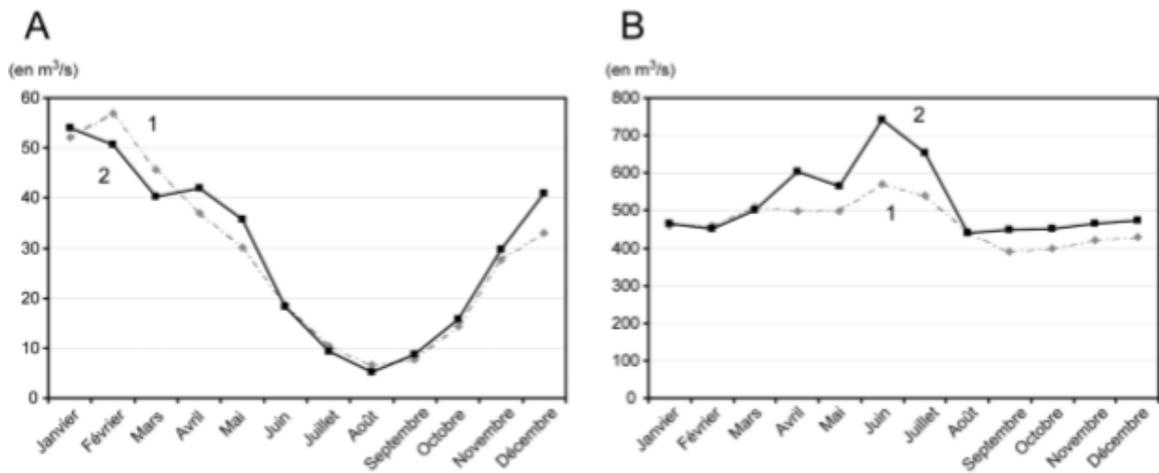
$$X_{esp} = Coef\ interception + a * V + b * V^2 + c * TV + d * TV^2 + e * TA + f * TA^2 + g * A + h * A^2 + i * G + j * G^2$$

$$P_{esp} = \frac{1}{1 + e^{-X_{esp}}}$$

Annexe 3: Valeurs des coefficients des différentes espèces intervenant dans le calcul de la probabilité de présence  
 Source : Lamouroux, 2010



[Annexe 4: Etude des incertitudes des paramètres environnementaux du RHT \(Pella et al., 2012\)](#)



[Annexe 5: Vérifications des débits du RHT par apport aux stations hydrométriques \(Pella et al., 2012\)](#)

L'approche ESTIMKART nécessite plusieurs paramètres d'entrées, disponibles ou non sur J2000 (tableau 3).

Paramètres d'entrée nécessaires	Disponibilité dans le modèle J2000	Source des données
Pente moyenne de l'arc	Vert	MNT
Altitude moyenne de l'arc		
Surface du bassin versant amont	Rouge	Gris
Distance à la source	Rouge	
Ordre de l'arc (rang de Strahler)	Rouge	
Débit modélisé, moyenne interannuelle	Jaune	Choix de la chronique à définir
Minimum des débits mensuels		
Températures moyennes de l'air (Janvier et Juillet)	Jaune	Données DRIAS (et météo France pour le changement climatique)
Grand bassin d'appartenance		
Identifiant	Vert	Gris
Non calc	Vert	Permet d'éliminer certains arcs de l'étude

Directement disponible	Vert
Disponible après traitement	Jaune
A créer	Rouge

La première étape a alors été de réaliser les couches manquantes, disponibles en [annexe 7](#).

- Surface du bassin versant amont
- Distance à la source

Ces deux couches ont nécessité l'agrégation du réseau (pour simuler la zone entière amont de l'arc considéré)

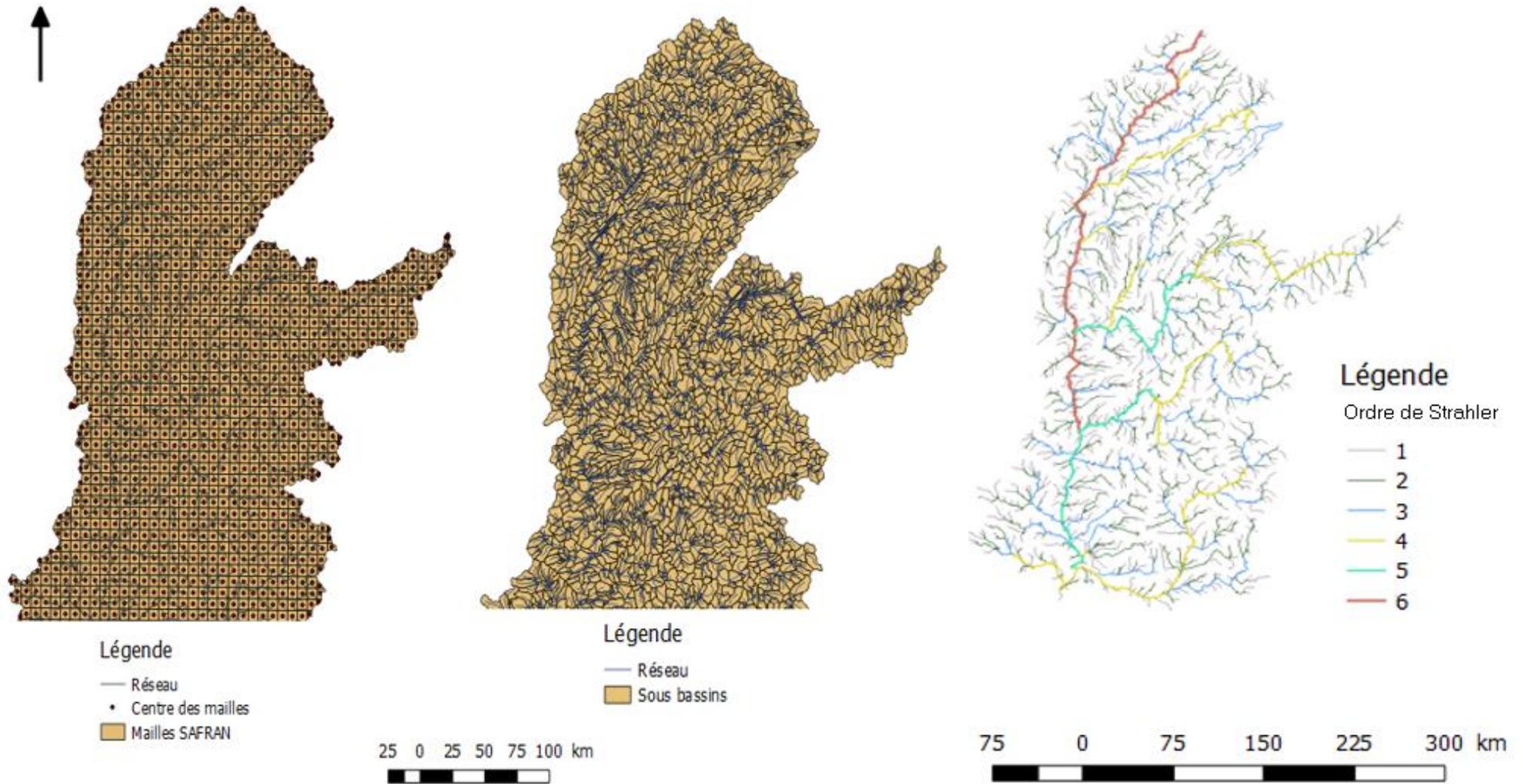
- Ordre de l'arc (rang de Strahler) : Cet ordre permet de hiérarchiser l'ensemble des arcs d'un réseau. Un arc n'ayant pas d'affluent sera affecté au nombre 1. Un arc de rang n+1 sera la confluence de deux rangs n.

Températures moyennes de l'air pour chaque arc (Janvier et Juillet) (données SAFRAN)

- Températures moyennes de l'air pour chaque arc (Janvier et Juillet) (données SAFRAN)

Les données SAFRAN sont simulées sur des mailles (8x8 km<sup>2</sup>). Des manipulations ont alors été nécessaires pour affecter la température de la maille à la plus proche à chaque arc.

[Annexe 6: Choix initial d'utiliser le réseau J2000](#)

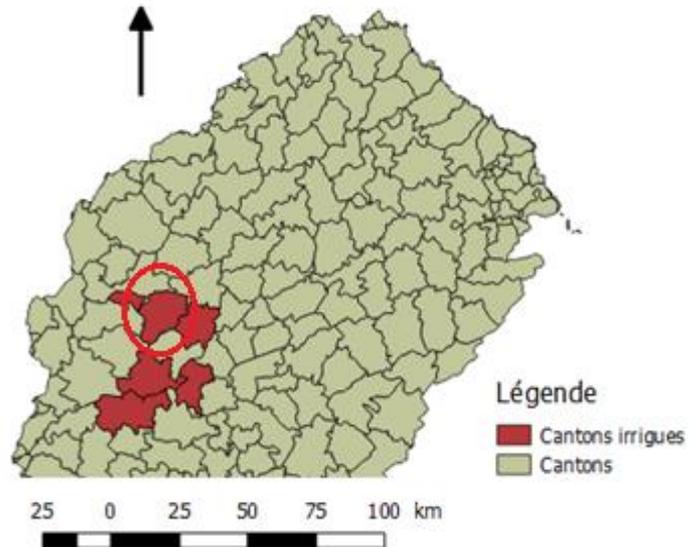


*Annexe 7: Réalisation des couches nécessaires à l'approche ESTIMKART : Mailles SAFRAN, sous-bassins versants et ordre de Strahler du réseau J2000*

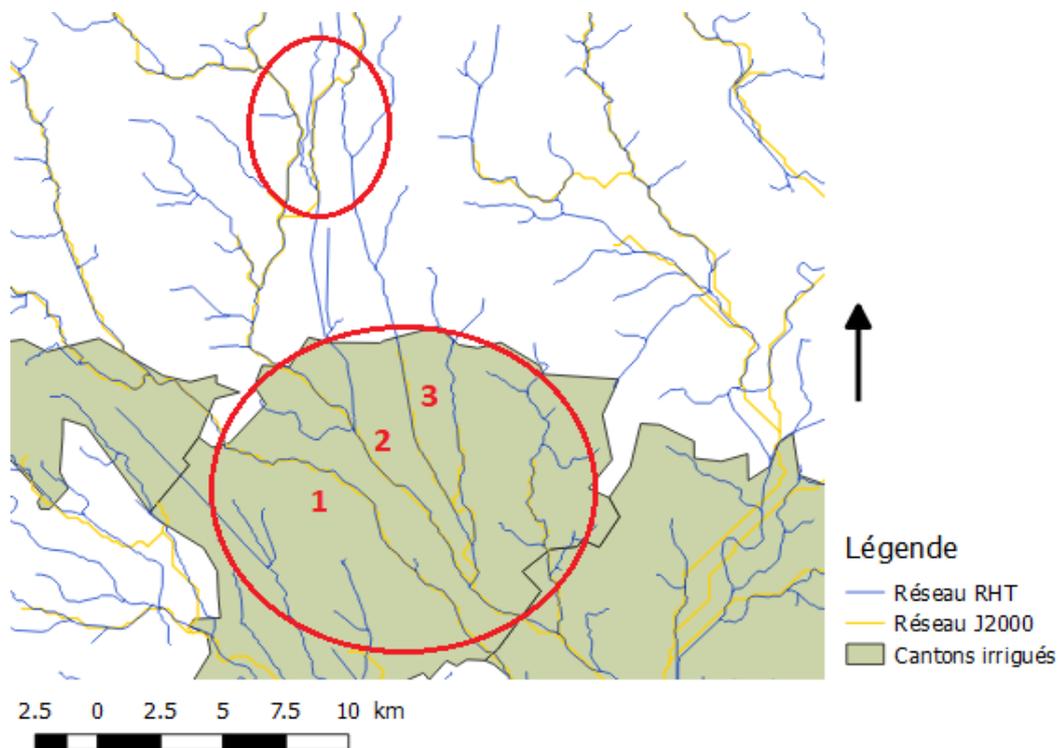
Dans le but d'analyser les résultats et d'ajuster certains attributs environnementaux de J2000 si nécessaire, une première analyse a été réalisée sur une partie du bassin versant d'étude, le sous bassin de la Saône (figure ci-contre).

Dans le cadre du projet Modélisation hydrologique distribuée du Rhône, plusieurs informations concernant l'agriculture (cultures dominantes, prélèvements, utilisation de la ressource en eau) ont été recueillies. Ce sous bassin a également été la zone d'étude de plusieurs scénarios de changement climatique.

Il apparaît également comme une zone fortement artificialisée (Tille, rivière SansFond).



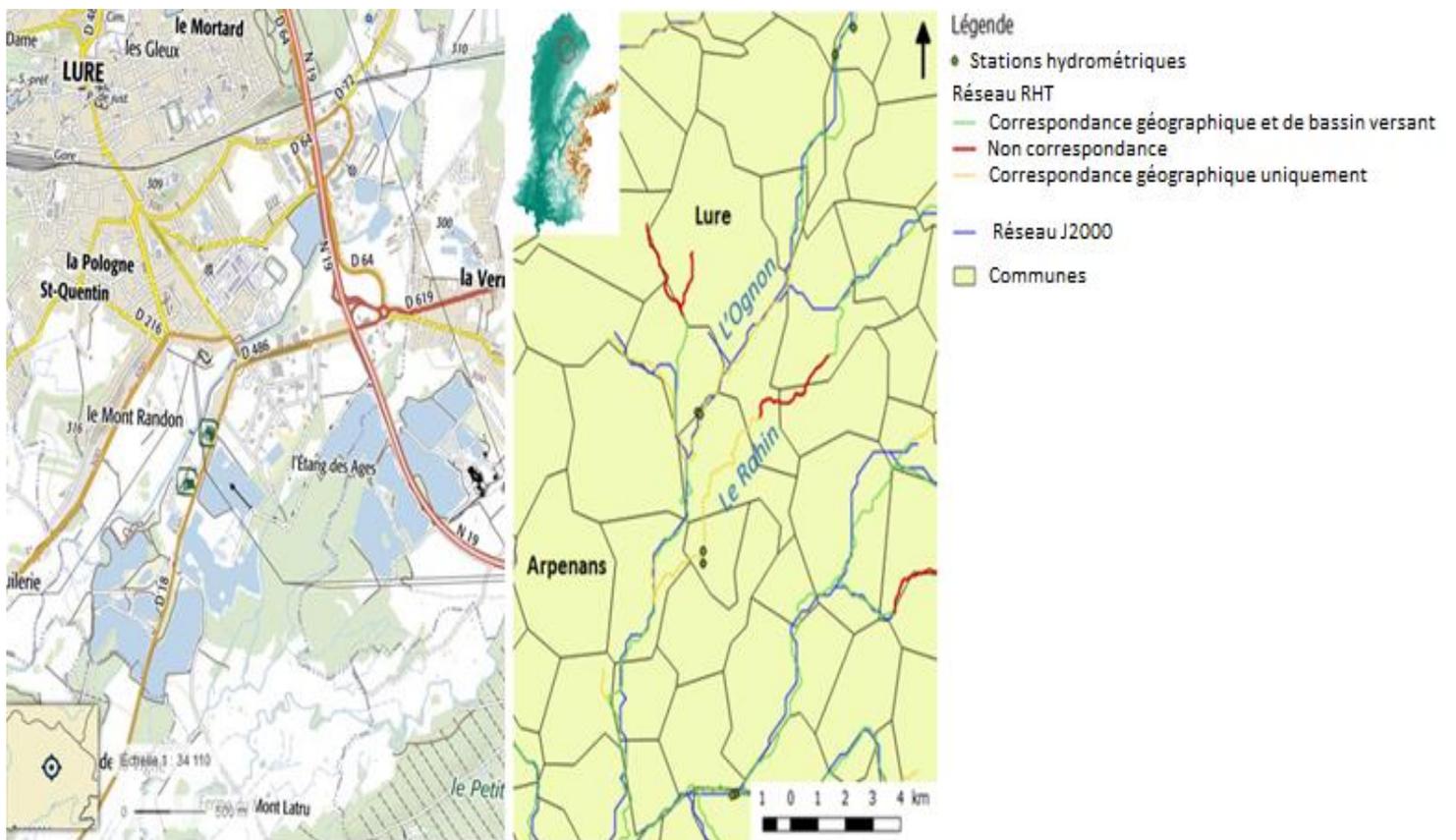
Des différences majeures de tracés ont été observées entre le réseau hydrographique lié à J2000 et le RHT. (Cercle du haut, Figure ci-dessous).



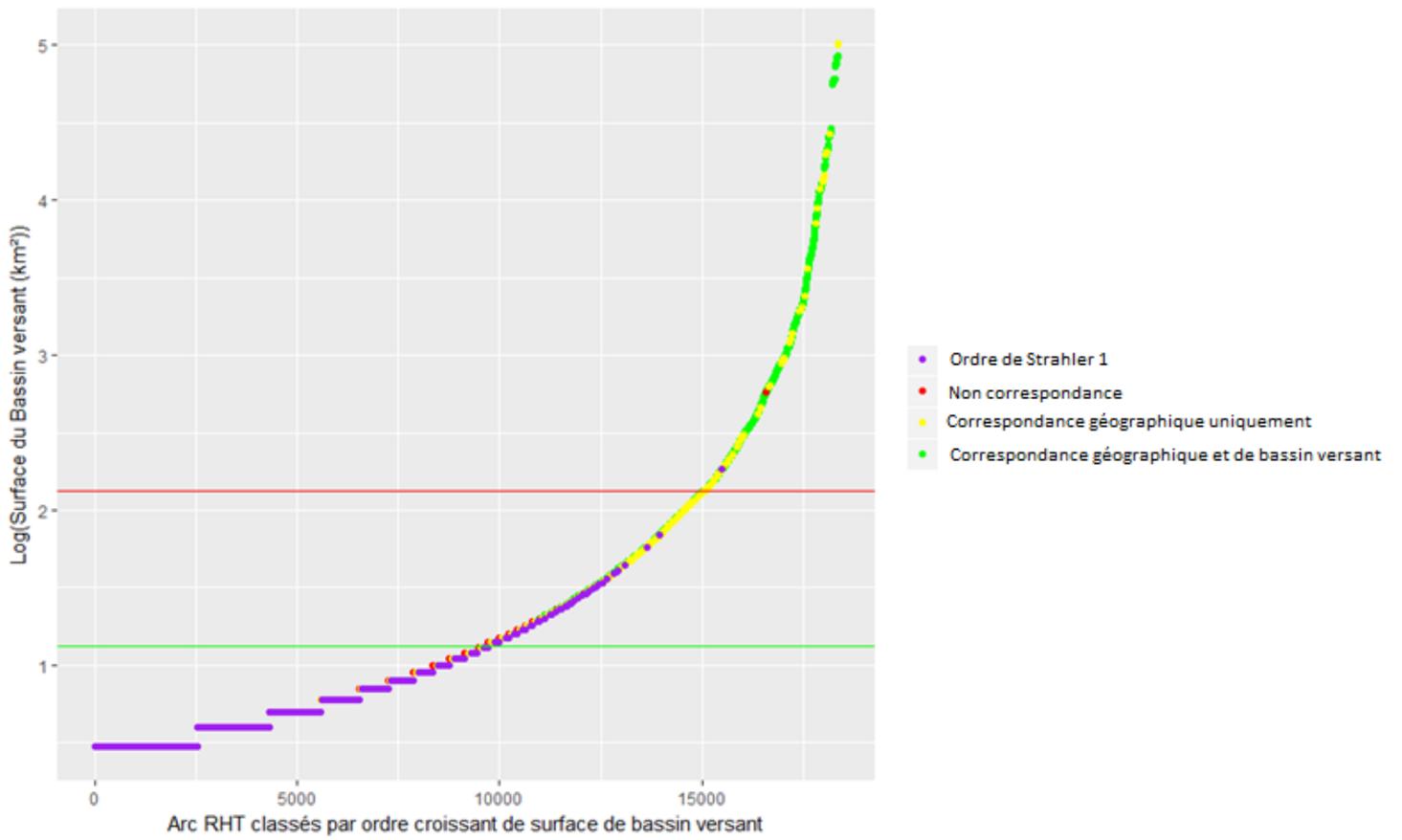
Cette différence de tracé entraîne des écarts majeurs entre les données RHT, plus précises et plus fiable, et les données de J2000 à l'aval de ces zones (notamment dans les surfaces de bassins versants amonts). (Tableau ci-dessous).

	Distance à la source (km)		Surface du bassin amont (km <sup>2</sup> )		Ordre de Strahler		Débit interannuel (m <sup>3</sup> /s)	
	J2000	RHT	J2000	RHT	J2000	RHT	J2000	RHT
<b>Correspondance 1</b>	65.9	88	923	985	3	4	10.56	9.30
<b>Correspondance 2</b>	67	45	1122	271	3	4	12.88	3.06
<b>Correspondance 3</b>	7.51	88	31.4	906	1	4	0.28	11.27

*Annexe 8: Etude préalable des attributs environnementaux du réseau J2000 sur une partie du sous bassin versant de la Saône*

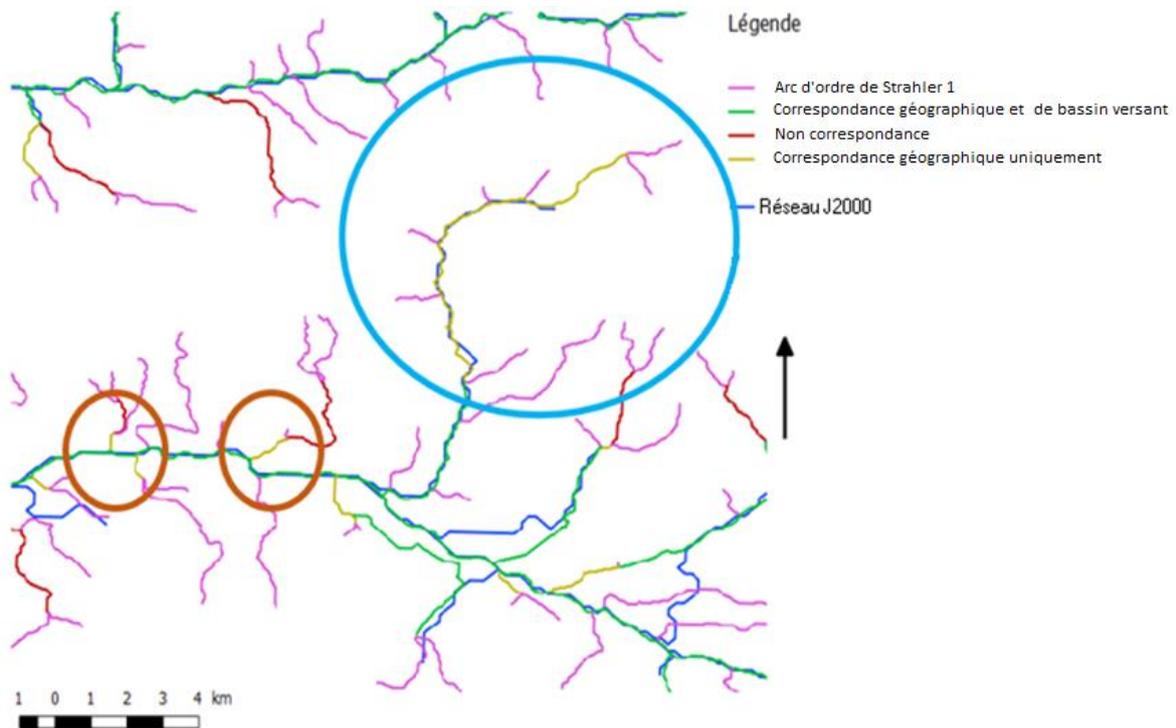


*Annexe 9: Exemple d'affectation aux stations hydrométriques*



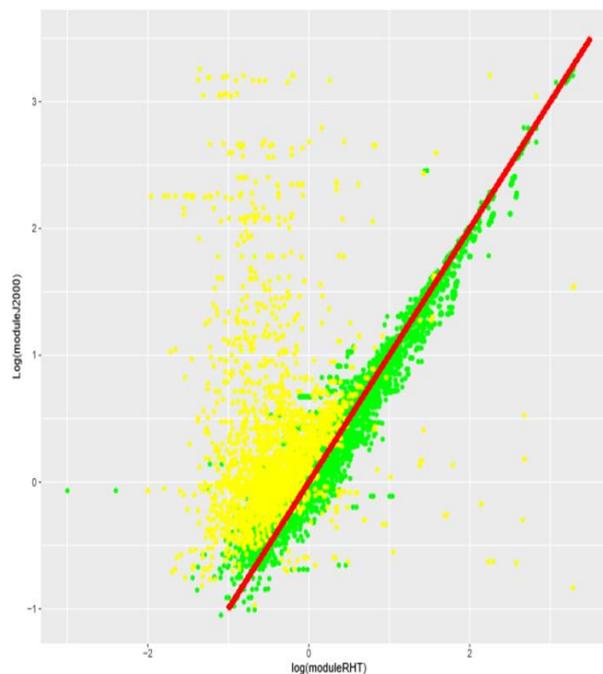
[Annexe 10](#): Evaluation de la correspondance en termes de surface de bassin versant amont

Dans cette partie de la correspondance, deux cas sont alors à distinguer Certains arcs sont associés à un tronçon aval plus important (cas des cercles oranges) où la transposition du débit apparaît comme impossible, alors que certains sont correctement superposés à un arc du J2000 (cercle bleu)



Une sélection a alors été effectuée sur un critère de débits pour écarter les écarts trop importants entre les modules du J2000 et les modules du RHT. Seuls les arcs ayant un arc aval vert (correspondance géographique et de bassin versant) et un écart de débits inférieur à 200% entre le débit simulé sur le RHT et sur J2000 seront intégrés à l'étude.

La figure ci-contre représente la comparaison des modules liés au RHT et ceux liés au réseau J2000.



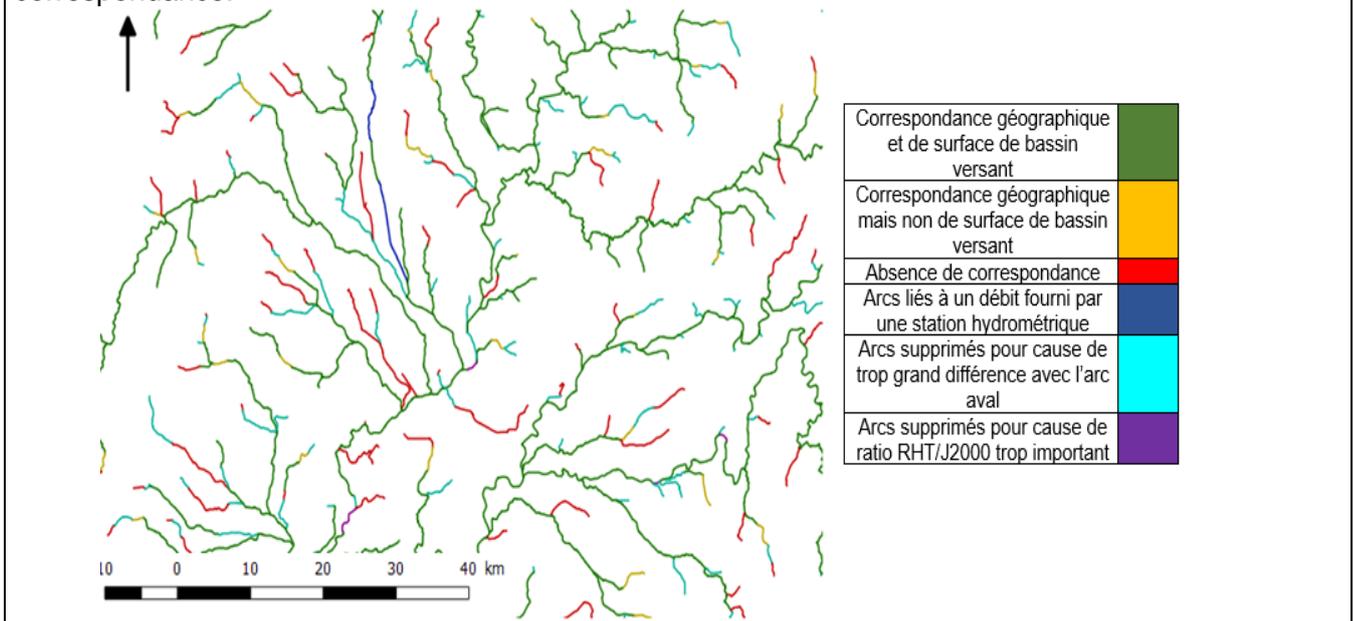
- Correspondance totale
- Correspondance uniquement géographique

Une bonne corrélation est observée pour les arcs ayant une correspondance de surface de bassin versant amont et géographique (verts). Au contraire, d'importantes différences sont observées pour les arcs ayant uniquement une correspondance géographique (jaunes).

Il est également important de signaler un écart plus marqué pour les petits débits. Cet écart est lié aux incertitudes liées à leur modélisation. En effet, les incertitudes concernant ces faibles débits (par exemple  $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ) peuvent atteindre  $\pm 100\%$  (Lamouroux et al., 2013).

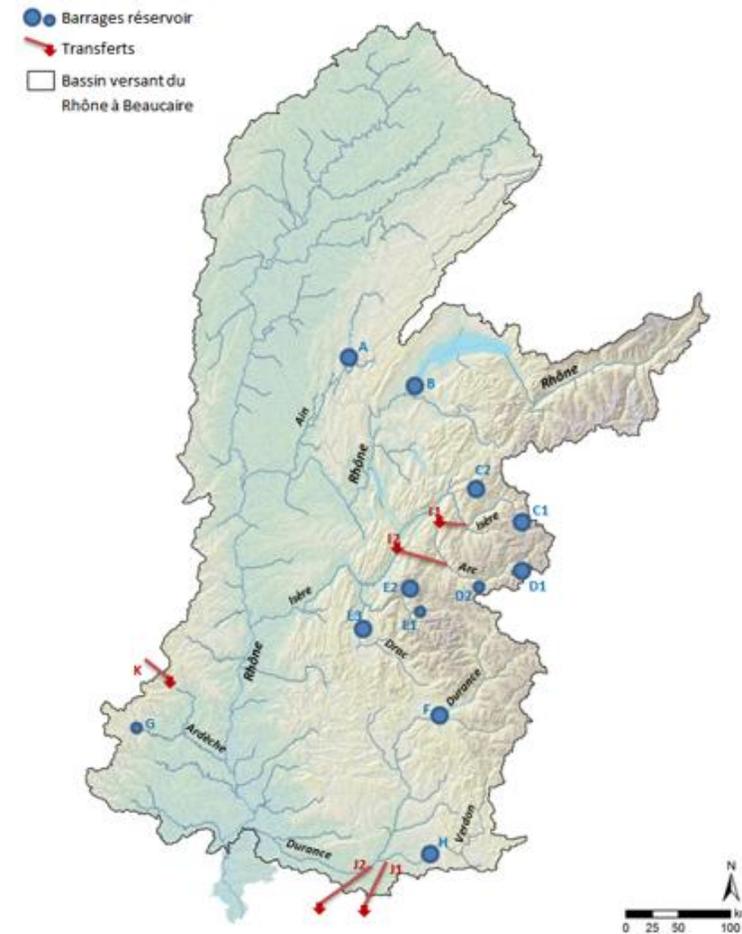
Une sélection sur le débit a également été réalisée sur l'ensemble des arcs restants dans l'étude, éliminant ceux pour lequel le rapport entre le module lié au RHT et celui lié au modèle J2000 était inférieur à 0.1 ou supérieur à 10.

La figure ci-dessous représente une cartographie de la classification des arcs du RHT après la correspondance.

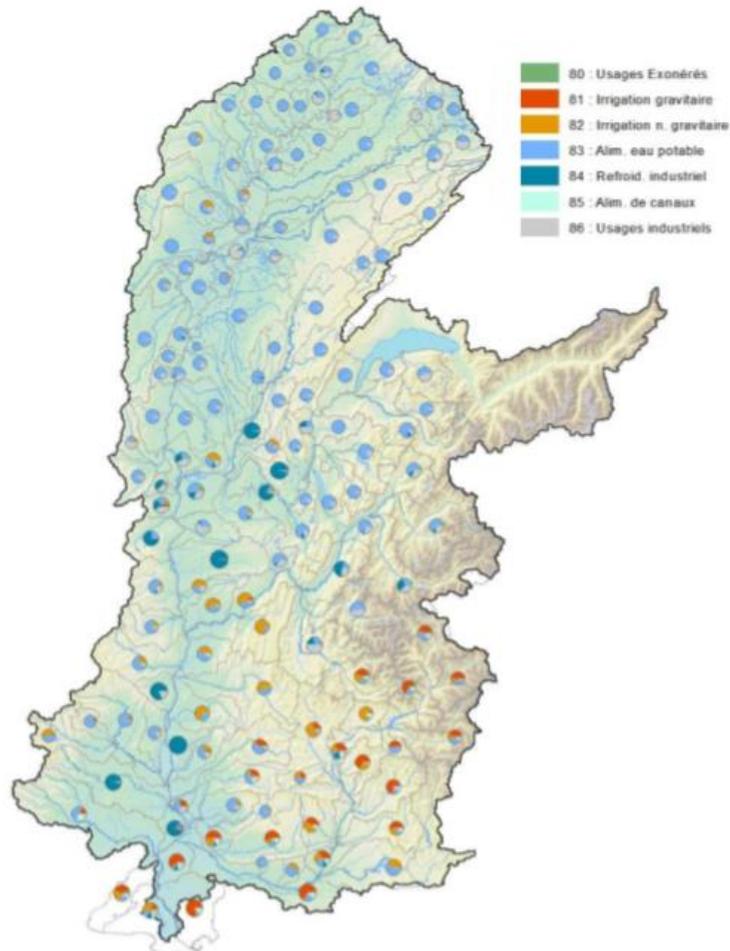


[Annexe 11: Correspondance J2000/RHT en termes de débits](#)

	Ouvrage	Type	Capacité max (Mm <sup>3</sup> )	Degré d'influence sur le débit (m <sup>3</sup> /s)
A	Vouglans	Barrage	600	+/- 30
B	Léman	Barrage	89000	+/- 50
C1	Tignes	Barrage	230	+/- 25
C2	Roselend	Barrage	210	+/- 25
D1	Mont-Cenis	Barrage	330	+/- 15
D2	Bissorte	Barrage	50	+/- 3
E1	Chambon	Barrage	50	+/- 4
E2	Grand Maison	Barrage	140	+/- 7
E3	Monteynard	Barrage	440	+/- 25
F	Serre Ponçon	Barrage	1040	+/- 100
G	Chassezac	Barrage	58	+/- 7
H	Sainte Croix	Barrage	760	+/- 15
I1	Isère-Arc	Dérivation		60
I2	Arc-Isère	Dérivation		40
J1	Verdon-Canaux	Transfert		20
J2	Durance-Canaux	Transfert		140
K	Loire-Ardèche	Transfert		8

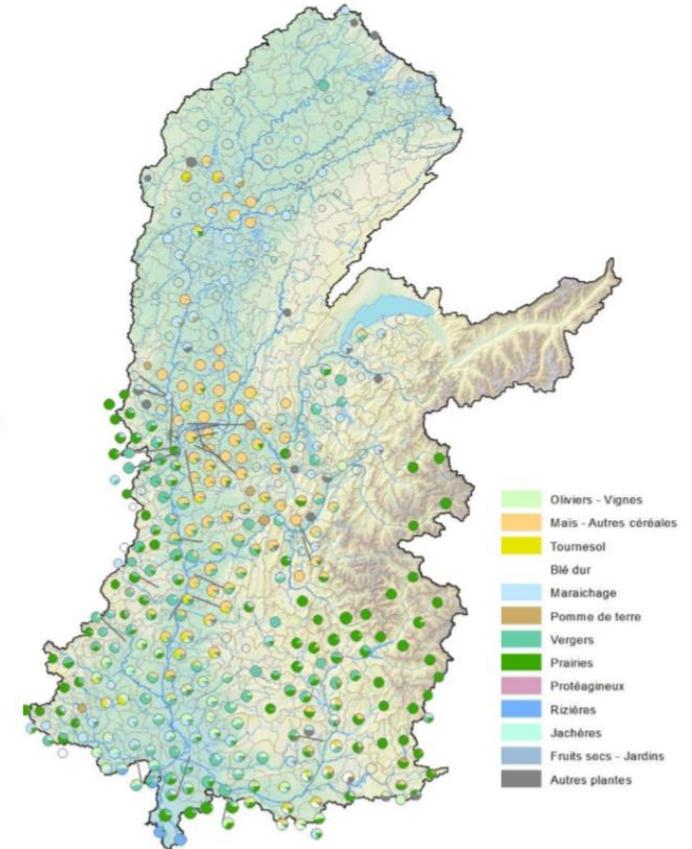


*Annexe 12: Localisation des ouvrages de régulation du débit modélisés dans J2000*

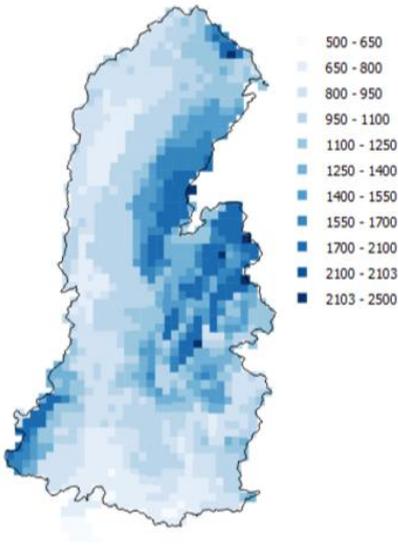


### Regroupement des cultures du RGA en grands ensembles :

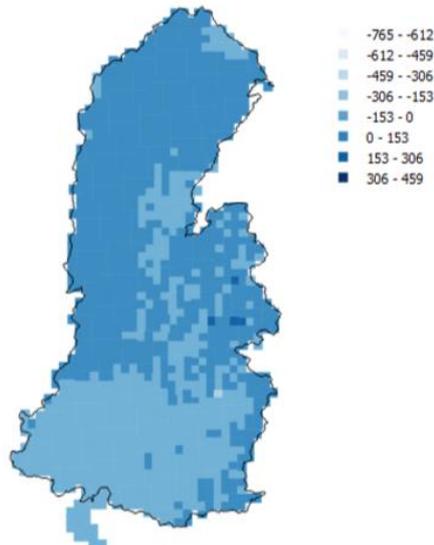
- **Vigne et olivier** (2 cultures)
- **Mais et autres céréales** (11) : Blé tendre Hiver & Printemps, Orge Hiver & Printemps, Avoine Hiver & Printemps, Triticale, Seigle, Mais, Autres Cultures Hiver & Printemps
- **Tournesol et sorgho** (2)
- **Blé dur** Hiver & Printemps (2)
- **Marachage** (1)
- **Pomme de terre** (1)
- **Vergers** (10) : Abricotiers, Cerisiers, Pêchers, Pruniers, Autres fruits à noyau, Fruits à pépins, Agrumes, Petits fruits, Fruits à coque et Autres (jonc, muriers, osier, ...)
- **Prairies** (4 types) (1)
- **Protéagineux** (1)
- **Riz** (2)
- **Jachères, pépinières, arbres de Noël et Energétique** (4) : Arbres de Noël, Pépinières, Cultures à vocation énergétique et Jachère
- **Divers** (3) : Plantes fibres, Fruits et légumes secs, Jardin et verger familiaux
- **Autres plantes** (2) : Plantes industrielles, Fleurs et plantes



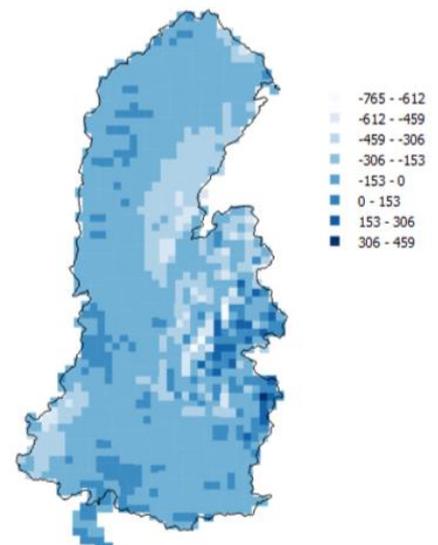
Période de référence: 1970-2005



RCP 2.6

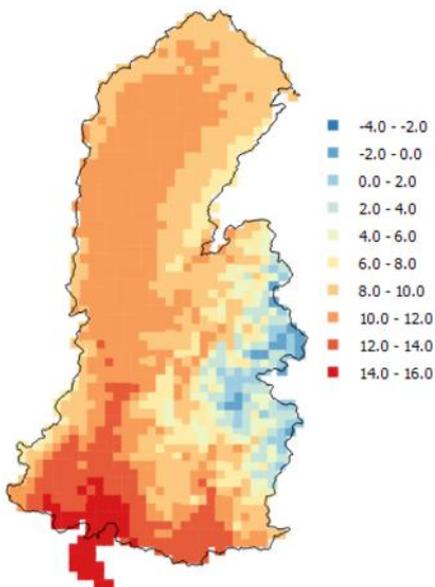


RCP 8.5

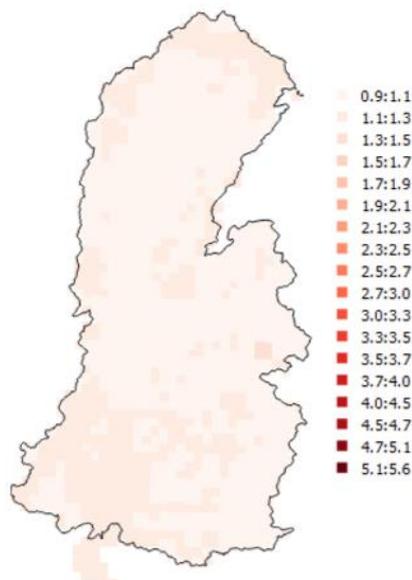


*Annexe 14: Ecart brut des cumuls de pluie interannuelle moyenne (2075-2100)*

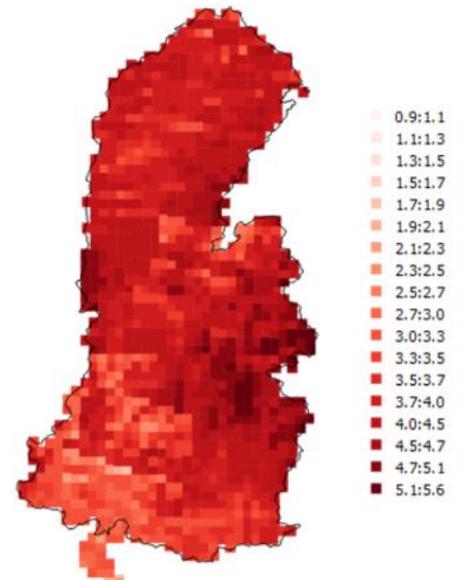
Période de référence: 1970-2005



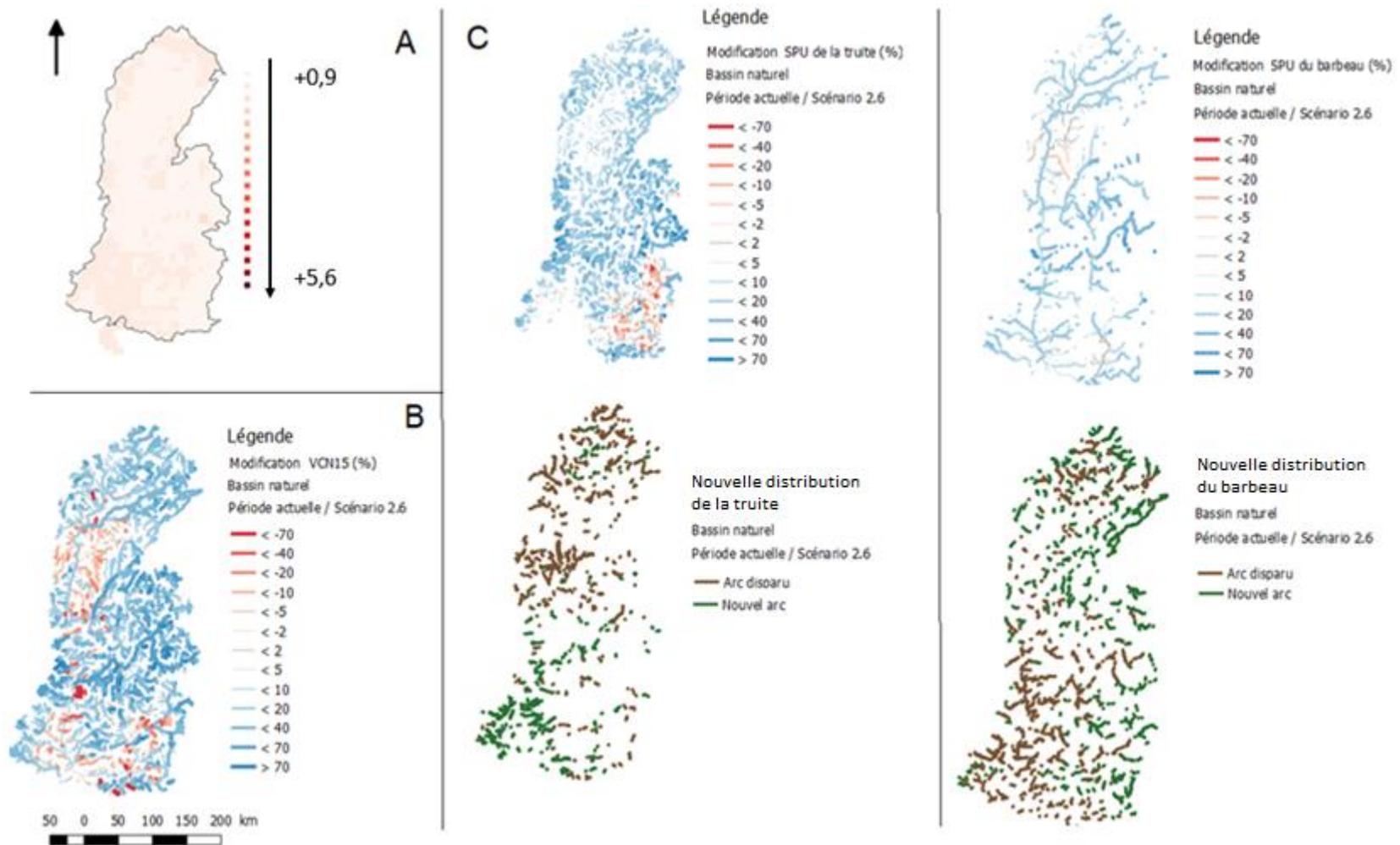
RCP 2.6



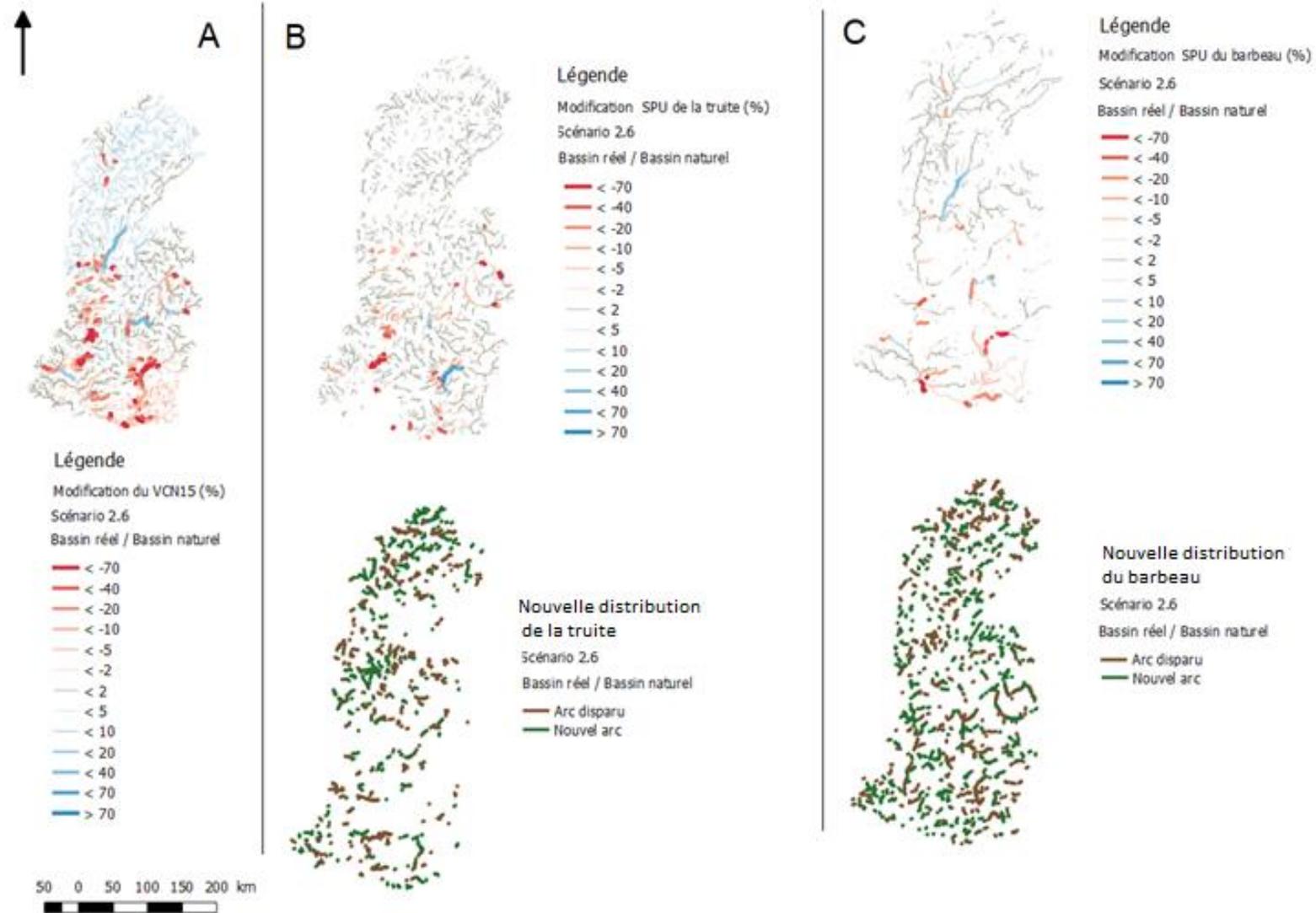
RCP 8.5



*Annexe 15: Ecart brut de température interannuelle moyenne (2075-2100)*



Annexe 16: A : Ecart brut de température pour le scénario 2.6 (2100) - B : Modifications du VCN15 (%) - C : Modifications de la SPU de la truite (%) et de la nouvelle distribution (%) - D : Modifications de la SPU du barbeau (%) et de la nouvelle distribution



Annexe 17: A: Modifications du VCN15 (%) liées à l'anthropisation du bassin dans le futur (scénario 2.6) - B: Modifications de la SPU de la truite (%) et de la nouvelle distribution- C: Modifications de la SPU du barbeau (%) et de la nouvelle distribution

## Bibliographie

Branger F., Gouttevin I., Montginoul M., Sauquet E., Braud I. **Projet MDR : Modélisation hydrologique distribuée du Rhône** (2016)

Chandesris, A., Pella, H. **Constitution d'une base d'information spatialisée « barrages, retenues et plans d'eau » au niveau national en vue d'évaluer les modifications hydro-morphologiques In : Appui scientifique à la mise en œuvre de la Directive Cadre sur l'Eau.** Lyon: Cemagref, BEA/LHQ, 2006, 11 p

Dunbar M.J., Alfredsen K. et Harby A. **Hydraulic-habitat modelling for setting environmental river flow needs for salmonids.** *Fisheries Ecology and Management*, 2012, Vol.19, p.500-517.

European Commission. **Ecological flows in the implementation of the Water Framework Directive.** *CIS Guidance Document, Technical Report*, 2015, n°.31, 108p.

FRANCE. MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DE L'ÉNERGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE LA MER. **Circulaire du 3 Août 2010 relative à la résorption des déséquilibres quantitatifs en matière de prélèvements d'eau et gestion collective des prélèvements d'irrigation dans les bassins où l'écart entre le volume prélevé en année quinquennale sèche et le volume prélevable est supérieur à un seuil de l'ordre de 30 % (s. d.)** [en ligne] *Texte non paru au Journal officiel*. [Consulté le 24/04/2018]  
<[http://www.bulletinofficiel.developpement-durable.gouv.fr/fiches/BO201017/met\\_20100017\\_0100\\_0025.pdf](http://www.bulletinofficiel.developpement-durable.gouv.fr/fiches/BO201017/met_20100017_0100_0025.pdf)>

FRANCE. MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE ET SOLIDAIRE. **Circulaire du 30 Juin 2008 relative à la résorption des déficits quantitatifs en matière de prélèvement d'eau et gestion collective des prélèvements d'irrigation (s. d.)**. [en ligne] *Texte non paru au Journal officiel*. [Consulté le 14/02/2018]  
<[https://aida.ineris.fr/consultation\\_document/7183](https://aida.ineris.fr/consultation_document/7183)>

FRANCE. MINISTERE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT. **Circulaire du 5 Juillet 2011 relative à l'application de l'articles L.214-18 du code de l'environnement sur les débits réservés à maintenir en cours d'eau.** *Texte non paru au Journal officiel*.

Jowett I.G et Biggs B.J.F. **Flow regime requirements and the biological effectiveness of habitat-based minimum flow assessments for six rivers.** *International Journal of River Basin Management*, 2006, vol.4, p.179-189.

Krause, P. Hanisch, S. **Simulation and analysis of the impact of projected climate change on the spatially distributed waterbalance in Thuringia, Germany.** *Advances in Geosciences*, 2009, n° 21, p.33-48.

Lamouroux, N. **Hydraulic geometry of stream reaches and ecological implications.** *Gravel-Bed Rivers VI: From Process Understanding to River Restoration*, 2008, n° 25, p.661-75.

Lamouroux, N., Augeard, B., Baran, P., Capra, H., Le Coarer, Y, Girard, V., Gouraud, V. et al.: **Débits écologiques: la place des modèles d'habitat hydraulique dans une démarche intégrée.** *EDP Sciences*, 2016.

Lamouroux N., Méricoux S., Dolédec S., Snelder T.H. **Transferability oh hydraulic preference models of aquatic macroinvertebrates.** *River Research and Applications*, 2012, Vol.29, p.933-937

Lamouroux N., Olivier J.-M. **Testing predictions of changes in fish abundance and community structure after flow restoration in four reaches of a large river (French Rhône).** *Freshwater Biology*, 2015, n°60, p.1118-1130.

Lamouroux N., Pella, H., Venderbecq A., Sauquet E., Lejot J. **Estimkart 2.0: Une plate-forme de modèles écohydrologiques pour contribuer à la gestion des cours d'eau à l'échelle des bassins français.** *Cemagref, Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, Onema*, 2010, Version provisoire.

Logez M., Bady P., Pont D. **Modelling the habitat requirement of riverine fish species at the European scale: sensitivity to temperature and precipitation and associated uncertainty.** *Ecology of Freshwater*, 2012, p.266-282

Miguel, C., Lamouroux, N., Pella, H., Labarthe, B., Flipo, N., Akopian, M., Belliard, J. **Altération d'habitat hydraulique à l'échelle des bassins versants : impacts des prélèvements en nappe du bassin Seine-Normandie.** *La Houille Blanche*, 2016, n° 3, p.65-74.

Oberdorff, T., Pont, D., Hugueny, B., Chessel, D. **A probabilistic model characterizing fish assemblages of French rivers: a framework for environmental assessment.** *Freshwater Biology*, 2001, n° 46, p.399-415.

Pella, H., Lejot, J. Lamouroux, N. Snelder, T. **Le réseau hydrographique théorique (RHT) français et ses attributs environnementaux.** *Géomorphologie : relief, processus, environnement* ; 2012, Vol.18, n° 3, p.317-336.

Poff N; L. et Matthews J.H. **Environmental flows in the Anthropocene: Past progress and future prospects.** *Current opinion in Environmental Sustainability*, 2013, Vol.5, p.1:19

Pragana, I., Boavida, I., Cortes, R., Pinheiro, A. **Hydropower plant operations scenarios to improve brown trout habitat.** *River Research and Applications*, 2017, n°33, p.364-376

Tennant D.L. **Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources.** *Fisheries*, 1976, Vol.1, p. 6-10

Thévenet A. **Intérêt des débris ligneux grossiers pour les poissons dans les grandes rivières.** *Thèse de doctorat, Université de Lyon I, Lyon, France*, 1998. 111p.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

**Diplôme(s) :** Ingénieur de l'ENGEES

**Spécialité :** Hydrosystèmes

**Auteur :** Nans GUICHONNET

Année : 2018

**Titre :** Altération d'habitat hydraulique liée à la gestion des débits, des prélèvements et du changement climatique dans le bassin du Rhône.

**Nombre de pages**    **texte :** 46                      **annexes :** 16

**Nombre de références bibliographiques :** 22

**Structure d'accueil :** Irstea – Centre de Lyon-Villeurbanne

**Maître de stage :** Nicolas LAMOUREUX

### Résumé

Les nouvelles exigences réglementaires ont accentué la nécessité de réaliser les études d'habitat hydraulique à une large échelle, classiquement réalisées à l'échelle du tronçon.

Une étude des altérations d'habitat hydraulique est basée sur la succession de plusieurs modèles : hydrologique, hydraulique et écologique et est liée à un réseau hydrographique, dans le but de représenter l'ensemble des cours d'eau étudiés.

Cette étude met aussi en lumière le cumul des incertitudes liés à la succession de ces modèles et à l'importance d'appréhender les résultats à une échelle suffisamment grande, comme un sous-bassin DCE.

**Mots-clés :** Habitat hydraulique, modélisation, large échelle