

ÉTUDE THERMIQUE DU RHÔNE

PHASE IV

SYNTHÈSE GRAND FORMAT



Domaine Scientifique de la Doua, Bât. CEI-66, Bd Niels Bohr, BP 2132
69603 VILLEURBANNE Cedex



75 avenue de Corzent BP 511
74203 THONON-LES-BAINS Cedex



IRSTEA Aix-en-Provence, Unité de Recherche Hydrobiologie
3275 Route de Cézanne, CS 40061
13182 AIX-EN-PROVENCE Cedex 5

IRSTEA Lyon, UR MALY : 1. Laboratoire DYNAM : dynamiques, indicateurs et modèles en écohydrologie, 2. Equipe écologie microbienne des hydrosystèmes anthropisés
5 rue de la Doua - CS 70077
69626 VILLEURBANNE Cedex



Université Lyon1
UMR CNRS 5023 LEHNA Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés
43 Boulevard du 11 Novembre 1918
69622 VILLEURBANNE Cedex



EDF - Division Technique Générale (avec la collaboration de EDF-CIDEN et EDF-LNHE)
Département S. /Service Environnement Aquatique
B.P. 41 - 21 Av de l'Europe
38040 GRENOBLE Cedex 9

Étude financée avec l'aide de l'Agence de l'eau RMC, de l'Union européenne et d'EDF :



L'étude Thermique du Rhône Phase 4 a été cofinancée par l'Union Européenne. L'Europe s'engage sur le fleuve Rhône avec le Fonds Européen de Développement Régional.

Glossaire

CNPE : Centre Nucléaire de Production d'Électricité

ETRPX : Etude Thermique Rhône Phase X (e.g. ETRP3, ETRP4)

QMNAX : Débit mensuel minimal annuel, d'occurrence X ans

RCC : Rhône Court-Circuité (Vieux Rhône) au droit d'un aménagement hydro-électrique

RNA : Modèle numérique de type « Réseau de Neurones Artificiels »

SDJ : Somme des degré.jour. Cumul des degrés, généralement au dessus d'un seuil de température.

TCC : Tronçon Court-Circuité (Vieux Rhône). Cf RCC.

VCN_X : Débit minimal sur N jours consécutifs, d'occurrence X ans

Définitions des principaux termes scientifiques

Espèce autochtone : espèce qui est présente sur son aire de répartition naturelle et qui s'y reproduit.

Espèce allochtone : espèce qui est présente hors de son aire de répartition naturelle et qui forme des populations pérennes.

Traits bio-écologiques : traits d'histoire de vie et de préférences écologiques.

Métrique: paramètre ou ensemble de paramètres décrivant une fonctionnalité de l'écosystème. Par exemple, le taux d'espèces détritivores, le nombre d'espèces exogènes, la richesse taxonomique, la diversité.

Effet rejet : effets localisés de l'échauffement de plusieurs degrés sur le milieu aquatique à l'aval immédiat des rejets des CNPE à circuit ouvert (avant dilution).

Effet site : effets globaux du site sur le milieu aquatique évalués après dilution par mélange, à l'aval éloigné d'un rejet thermique.

Phases nyctémérales : différentes parties du cycle biologique journalier structurées autour des alternances jour-nuit.

Goutte froide: dénomination attribuée à un accident thermique remarquable en lien avec un brusque apport d'eau froide de fond du lac Léman. La chute rapide de la température des eaux du fleuve peut atteindre 10°C et durer 2 à 3 jours.

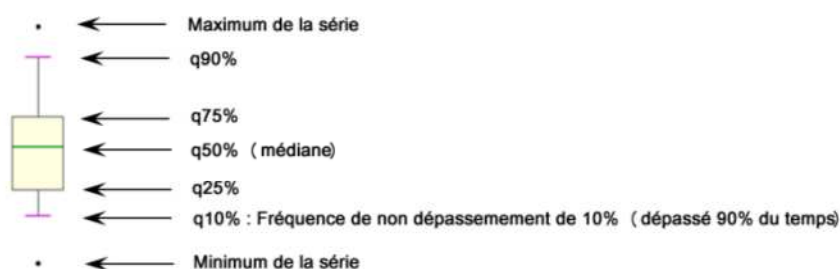
Lentique ou lénitique : qui définit une zone ou un faciès à courant très faible.

Lotique : qui définit une zone ou un faciès courant d'un cours d'eau. Lorsque les vitesses du courant sont bien marquées, voire fortes, les organismes sont dits rhéophiles.

Espèce rhéophile : espèce ayant la capacité de vivre dans les zones à fort courant.

Espèce lénitophile : espèce ayant la capacité de vivre dans les zones à courant faible ou nul.

Signification des libellés statistiques



Sommaire

1.	Les grandes lignes des phases précédentes de l'étude Thermique du Rhône	5
1.1.	Phase 1 : quels sont l'état et l'évolution thermiques du Rhône et de ses affluents sur la période [1977-2003]	5
1.2.	Phase 2 : quels sont les facteurs qui expliquent la température de l'eau ? Quelle est la part relative des rejets thermiques des CNPE sur cette température ?	6
1.3.	Phase 3 : quel est l'effet de la température sur les écosystèmes rhodaniens ?	6
2.	Contexte et objectifs de la phase 4	8
3.	Réponses aux questions initialement posées	9
3.1.	Comment se place l'évolution des températures et des débits sur les 3 dernières décennies par rapport à l'évolution depuis 1920 ?	10
3.2.	Quelle est la relation entre l'hydrologie et la température du Rhône, et notamment en quoi la gestion hydraulique du Rhône suisse et des affluents influence les facteurs écologiques à bas débits ?	14
3.3.	Quelles sont les amplitudes journalières de la température du Rhône ?	16
3.4.	La hausse de température constatée a-t-elle une influence sur les espèces introduites et/ou envahissantes ?	18
3.5.	Dans la configuration particulière du Rhône, quels sont les rôles respectifs des retenues/canaux/tronçons court-circuités dans la dynamique des populations ?	22
3.6.	Quelle est la répartition spatiale et temporelle des habitats hydrauliques et thermique s? Comment les poissons utilisent-ils ces habitats ?	24
3.7.	Existe-t-il des espèces ou un ensemble d'espèces d'invertébrés traduisant des effets des conditions thermiques ?	26
3.8.	La température influence-t-elle la croissance et la survie des organismes ?	29
3.9.	Quels sont les effets d'une augmentation de température sur les communautés microbiennes du Rhône ?	32
4.	Conclusion des études menées dans le cadre de la phase 4	35
5.	Bibliographie produite dans le cadre de l'étude Rhône Phase 4	39
5.1.	Rapports et Livrables	39
5.2.	Publications dans les revues scientifiques à comité de lecture	39
5.3.	Communications dans le cadre de colloques	40
5.4.	Thèse universitaire	40
6.	Annexe - Localisation des stations de suivis utilisées dans le cadre de l'ETRP4 (programme de surveillance hydro-écologique des CNPE du Rhône et stations spécifiques)	41
6.1.	CNPE de BUGEY. Localisation des stations de mesure du programme de surveillance hydro-écologique	41

6.2. CNPE de Saint-Alban. Localisation des stations de mesure du programme de surveillance hydro-écologique.....	42
6.3. CNPE de Cruas. Localisation des stations de pêche du programme de surveillance hydro-écologique.....	43
6.4. CNPE de Tricastin. Localisation des stations de pêche du programme de surveillance hydro-écologique.....	44
6.5. Sites suivis spécifiquement lors de l'ETRP4 à Péage-de-Roussillon et à Baix-Le Logis Neuf ..	45

Table des figures

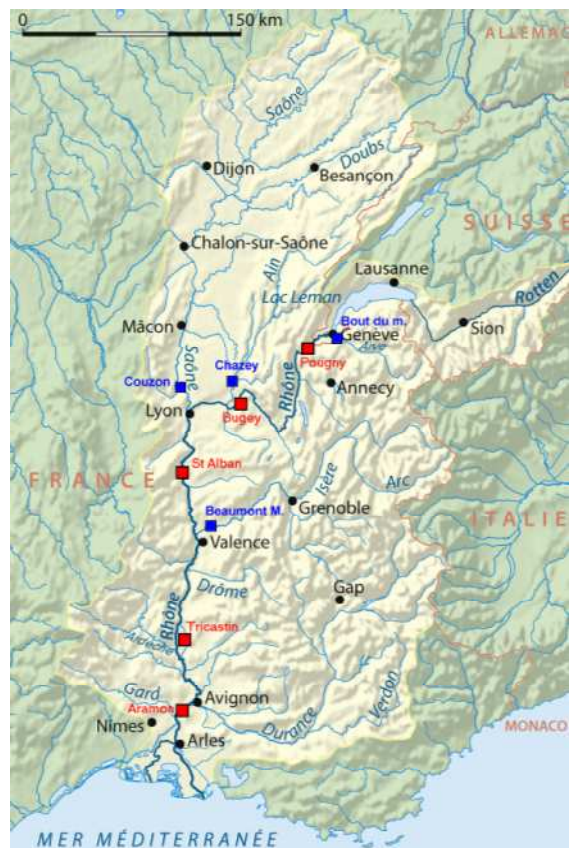
Figure 1. Extrait d'une fiche de synthèse thermique.....	10
Figure 2. Évolution des moyennes annuelles de la température de l'eau [1920-2010], et des chroniques de puissance de CNPE. Sources des données de température : [1920-1976] : données modélisées;/ [1977-2010] : mesures.....	12
Figure 3. Évolution des températures les plus élevées de l'année (q95%) en simulant l'absence de rejets thermiques des CNPE.....	13
Figure 4. Incidence (effet direct) d'une augmentation unitaire (1 m ³ /s) des débits de l'Arve sur la température de l'eau du Rhône à Pougny (une incidence positive indique un refroidissement)	15
Figure 5. Régime saisonnier des amplitudes thermiques à Pougny (à gauche) et à Amont Tricastin (à droite).....	17
Figure 6. Distribution des amplitudes thermiques journalières en fonction des débits, à Pougny (à gauche), et à Tricastin (à droite)	18
Figure 7. Exemple de fiche extraite de l'atlas pour l'espèce <i>Dikerogammarus villosus</i> (les périodes temporelles les plus anciennes ne sont pas mentionnées pour cette espèce récente sur le Rhône)	19
Figure 8. Liste des crustacés inventoriés depuis 1985 au droit du CNPE de Saint-Alban	20
Figure 9. Évolution d'un indice d'effectifs de 5 espèces allochtones échantillonnées, par pêche électrique de rives, sur le cours principal du Rhône (retenue de Montélimar, canal de Donzère-Mondragon, retenue de Caderousse).	21
Figure 10. Schéma de principe d'un RCC (CNR, modifié).....	22
Figure 11. Suivi des températures de l'eau le long du RCC de Baix	22
Figure 12. Abondances relatives des crustacés dans le RCC et la retenue de Péage (stations « amont » et « aval »).....	23
Figure 13. Distribution spatiale des localisations de tous les individus repérés le jour (été 2009), pour des débits compris entre 300 et 500 m ³ /s (à gauche) et emprises simplifiées du panache d'eau chaude (+2°C par rapport à la température amont) issues du modèle hydrodynamique 2D (à droite)	24
Figure 14. Synthèse de l'évolution temporelle des peuplements de macroinvertébrés du Rhône	28
Figure 15. Synthèse schématique des effets de la température et du débit sur la taille et la dynamique des juvéniles (les droites en pointillés représentent les relations qui nécessitent un approfondissement des connaissances).....	31
Figure 16. Analyse en Composantes Principales (ACP) des données physico-chimiques et microbiennes après 3 semaines, dans les 4 expériences en microcosmes (i.e. Bugey/Tricastin ; juillet/septembre) ..	33

1. LES GRANDES LIGNES DES PHASES PRÉCÉDENTES DE L'ÉTUDE THERMIQUE DU RHÔNE

Le bassin versant du Rhône (96 500 km²) est principalement localisé en France, même si une partie minoritaire est située en Suisse (7000 km²).

L'Étude Thermique du Rhône a été initiée en 1999 par la DRIRE dans l'objectif de caractériser l'effet des rejets des CNPE du Rhône. La caractérisation de l'échauffement des CNPE a été confiée à un groupe de travail qui a défini 3 phases successives et cohérentes complétées par une 4^{ème} phase plus exploratoire.

Carte du bassin versant du Rhône, des principaux affluents, et des sites d'études de la température de l'eau (en rouge sur le linéaire du Rhône, en bleu sur les affluents)

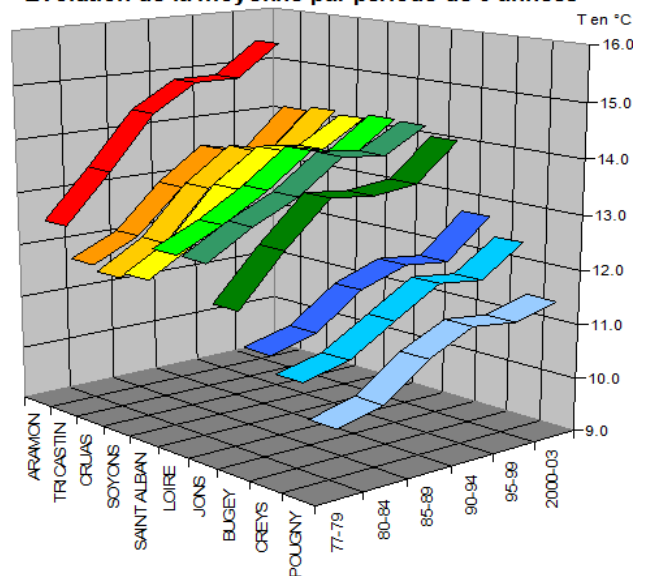


1.1. PHASE 1 : QUELS SONT L'ÉTAT ET L'ÉVOLUTION THERMIQUES DU RHÔNE ET DE SES AFFLUENTS SUR LA PÉRIODE [1977-2003]

Un réseau de stations réparties sur le Rhône et ses 3 affluents majeurs révèle les tendances suivantes :

- La température moyenne augmente de l'amont à l'aval du Rhône français mais de façon non-linéaire.
- Les affluents jouent des rôles différents : la Saône est un affluent chaud, l'Ain un affluent froid en hiver et chaud en été et l'Isère un affluent très froid.
- À l'échelle pluriannuelle, le Rhône et ses affluents ont vu leur température augmenter de +0.5 à +1.6°C selon les stations (+1.5°C à +2°C pour le mois le plus chaud de l'été). L'année 2003 cumule tous les *maxima* historiques.
- Les amplitudes journalières moyennes sont très faibles sur le Rhône (de l'ordre de 0.5°C).

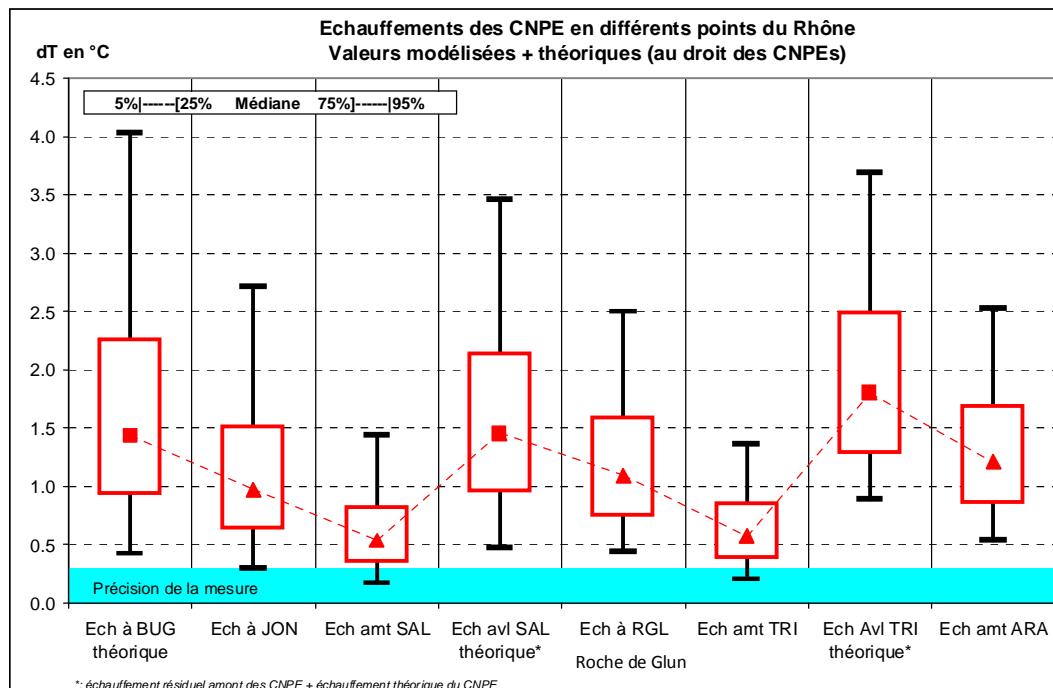
Evolution de la moyenne par période de 5 années



Pour des séries plus longues et actualisées jusqu'en 2010, voir la Figure 2 issue des études de la phase 4.

1.2. PHASE 2 : QUELS SONT LES FACTEURS QUI EXPLIQUENT LA TEMPÉRATURE DE L'EAU ? QUELLE EST LA PART RELATIVE DES REJETS THERMIQUES DES CNPE SUR CETTE TEMPÉRATURE ?

Les grands facteurs qui influent sur la température de l'eau du Rhône français sont les transferts amont-aval d'eau, la discontinuité du lac Léman et dans une moindre mesure les conditions météorologiques locales schématisables par la température de l'air, la dilution par les affluents et les échauffements des CNPE.



Les échauffements liés aux rejets des différents CNPE ne s'additionnent pas d'amont en aval mais se conjuguent. Un échauffement résiduel subsiste à l'amont des sites de production. L'échauffement médian est de 0.5°C à Saint-Alban et Tricastin et de 1.3°C à Aramon ; 95 % du temps, cet échauffement ne dépasse pas 1.5°C à l'amont de St Alban, 1.4°C à l'amont de Tricastin et 2.5°C à l'amont d'Aramon.

1.3. PHASE 3 : QUEL EST L'EFFET DE LA TEMPÉRATURE SUR LES ÉCOSYSTÈMES RHODANIENS ?

Dans le contexte complexe du Rhône (thermique, modifications morphodynamiques, pollution, arrivées de nouvelles espèces, changement climatique...), les analyses mettent en évidence :

- une différenciation nette entre le Haut et le Bas-Rhône pour tous les compartiments biologiques,
- une dérive temporelle marquée des communautés biologiques, avec une évolution de leur composition vers des espèces d'eaux chaudes et lentes, au détriment des espèces d'eaux froides et rapides notamment sur le Bas-Rhône,
- une absence de différence significative entre les peuplements amont et aval des CNPE,
- que les évolutions chimiques expliquent pour partie les évolutions observées sur les peuplements d'invertébrés, alors que les grandes crues ont eu des effets notables sur les poissons,

- qu'à l'échelle locale, les rejets thermiques des CNPE en « circuit ouvert » montrent, dans certains cas, un effet sur la richesse du peuplement d'invertébrés, sur la composition des stations piscicoles ou sur la diversité des végétaux supérieurs. Ces effets « rejet thermique » restent parfois moins forts que la variabilité inter-annuelle.

L'ETRP3 montrait l'intérêt de poursuivre les séries chronologiques de suivi physico-chimiques et biologiques pour mieux comprendre les écosystèmes et démontrait la pertinence physique et biologique de fixer les limites thermiques réglementaires au pas de temps journalier.

2. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE LA PHASE 4

L'Étude Thermique du Rhône a été initiée par le Préfet coordonateur du bassin Rhône-Méditerranée suite à un avis du Conseil Scientifique du Comité de bassin (23/11/1999). Sa réalisation a été confiée à EDF, sous pilotage d'un comité réunissant notamment l'Administration, l'ONEMA, l'Agence Régionale de Santé, la CNR et EDF. De nombreuses équipes scientifiques ont été associées aux travaux.

L'Étude Thermique du Rhône Phase 3 concluait sur des questions en lien avec certaines thématiques mais également mettait en évidence certains « verrous » scientifiques.

L'élaboration de l'Étude Rhône Phase 4 est issue d'une collaboration entre les équipes de chercheurs, les principaux usagers industriels (EDF, CNR, ...), les gestionnaires comme l'Agence de l'eau RM&C (appuyé par le Conseil Scientifique du Comité de Bassin) et l'Administration (ASN, DREAL, ONEMA, Service de la navigation, ...). L'ETRP4, dont la réalisation a été pilotée par EDF, a ainsi été définie pour apporter des éléments de réponse aux questions importantes sur l'incidence croisée de l'hydrologie et de la thermie sur l'écologie du fleuve, en lien avec :

- la croissance et la survie des jeunes stades de poissons,
- la dynamique temporelle d'espèces introduites et/ou envahissantes,
- la répartition spatiale et temporelle des habitats et leur utilisation par les poissons,
- l'activité métabolique du compartiment microbien présent dans les biofilms et les sédiments,
- les traits biologiques des invertébrés en tant qu'indicateur de « l'effet thermique ».

Par ailleurs, l'ETRP4 a également pour objectif de mieux comprendre le fonctionnement plus global du Rhône, notamment pour les aspects suivants :

- les interactions entre les tronçons court-circuités et le chenal principal pour les populations d'invertébrés et poissons,
- la relation entre l'hydrologie et les conditions thermiques et l'évolution historique des températures depuis la fin du XIX^e siècle, y compris en quoi les modes de gestion peuvent avoir un effet sur les facteurs de réchauffement et de dilution du fleuve.

Un comité de pilotage, présidé par la DREAL, a été mis en place pour orienter l'étude et s'assurer du respect des objectifs et du planning. Les actions à mener sont décrites dans un cahier des charges, complété par un *addendum* (28/01/2011), validés lors du comité de pilotage du 6/12/2011.

Compte tenu des domaines d'activités des équipes de recherche, les questions ont été déclinées sous forme de lots pilotés par les différentes entités (ARALEP, EDF-DTG, INRA, IRSTEA et LEHNA de l'Université Claude Bernard). Certains lots ont débuté en 2008 et les rendus de l'ensemble des lots se sont achevés en 2013.

3. RÉPONSES AUX QUESTIONS INITIALEMENT POSÉES

Le corps de cette synthèse est structuré autour des principales questions développées dans les documents définissant (cahier des charges et addendum) les études à réaliser. Ces grandes questions et le découpage associé, en lots, sont présentés dans le tableau ci-après :

N° de la Question	Intitulé de la question	Lots concernés	Co-auteurs
1	Comment se place l'évolution des températures et des débits sur les 3 dernières décennies par rapport à l'évolution depuis 1920 ?	5	Sébastien Langlais ¹ , Alain Poirrel ¹ , Christian Perret ¹ , Philippe Gosse ² et Frédéric Hendrickx ²
2	Quelle est la relation entre l'hydrologie et la température du Rhône, et notamment en quoi la gestion hydrologique du Rhône suisse et des affluents influence les facteurs écologiques à bas débits ?	5	Sébastien Langlais ¹ , Alain Poirrel ¹ , Christian Perret ¹ , Philippe Gosse ² et Frédéric Hendrickx ²
3	Quelles sont les amplitudes journalières de la température du Rhône ?	5	Sébastien Langlais ¹ , Alain Poirrel ¹ , Christian Perret ¹ , Philippe Gosse ² et Frédéric Hendrickx ²
4	La hausse de température a-t-elle une influence sur les espèces introduites et/ou envahissantes ?	1, 3b, 4	Sébastien Langlais ¹ , Sylvie Méricoux-Lhopital ³ , Georges Carrel ⁴ et Cécile Delattre ²
5	Dans la configuration particulière du Rhône, quels sont les rôles respectifs des retenues/canaux/tronçons court-circuités dans la dynamique des populations ?	3c, 3d	Sébastien Langlais ¹ , Jean-François Fruget ⁵ , Nicolas Péru ⁶ et Jean-Michel Olivier ⁶
6	Quelle est la répartition spatiale et temporelle des habitats hydraulique et thermique ? Comment les poissons utilisent-ils ces habitats ?	4, 3c	Sébastien Langlais ¹ , Cécile Delattre ² , Hervé Capra ⁷ et Sylvie Méricoux-Lhopital ³
7	Existe-t-il des espèces ou un ensemble d'espèces d'invertébrés traduisant des effets des conditions thermiques ?	3a, 3b	Sylvie Méricoux-Lhopital ³ , Sébastien Langlais ¹ , Jean-François Fruget ⁵ et Cécile Delattre ²
8	La température influence-t-elle la croissance et la survie des organismes ?	2, 3d	Nicolas Péru ⁶ , Jean-Michel Olivier ⁶ , Georges Carrel ⁴ , Sylvie Méricoux-Lhopital ³ et Cécile Delattre ²
9	Quels sont les effets d'une augmentation de température sur les communautés microbiennes du Rhône ?	7	Sébastien Langlais ¹ , Aurélie Tournon-Bodilis ² , Stéphane Pesce ⁷ et Bernard Montuelle ⁸

- 1 EDF-DTG
- 2 EDF-LNHE
- 3 EDF-CIDEN
- 4 IRSTEA Aix-en-Provence
- 5 ARALEP
- 6 LEHNA
- 7 IRSTEA Lyon
- 8 INRA Thonon

3.1. COMMENT SE PLACE L'ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES ET DES DÉBITS SUR LES 3 DERNIÈRES DÉCENNIES PAR RAPPORT À L'ÉVOLUTION DEPUIS 1920 ?

Des séries continues de mesures de température existent sur le Rhône et ses principaux affluents depuis la fin des années 1970. L'analyse des chroniques des trois dernières décennies montre une augmentation des températures de l'eau pouvant atteindre plusieurs degrés. Pour mettre en perspective cette évolution récente avec les modifications en termes d'aménagement et de changement climatique, des chroniques à plus longue portée temporelle ont été reconstituées par modélisation depuis 1920.

De nouvelles données patrimoniales

Contrairement aux informations sur la température de l'eau, les données de débit et de température de l'air existent depuis 1920 pour la plupart des stations hydrométriques étudiées. Les chroniques patrimoniales de température de l'eau ont été étendues par modélisation de type Réseaux de Neurones à la période 1920-2010, et leurs caractéristiques statistiques ont été formalisées sous forme de fiches de synthèse¹ (Figure 1) pour les 5 stations du Rhône (Poungny, Bugéy, Saint-Alban, Tricastin et Aramon) et les 4 stations de ses affluents majeurs (Arve, Ain, Saône et Isère).

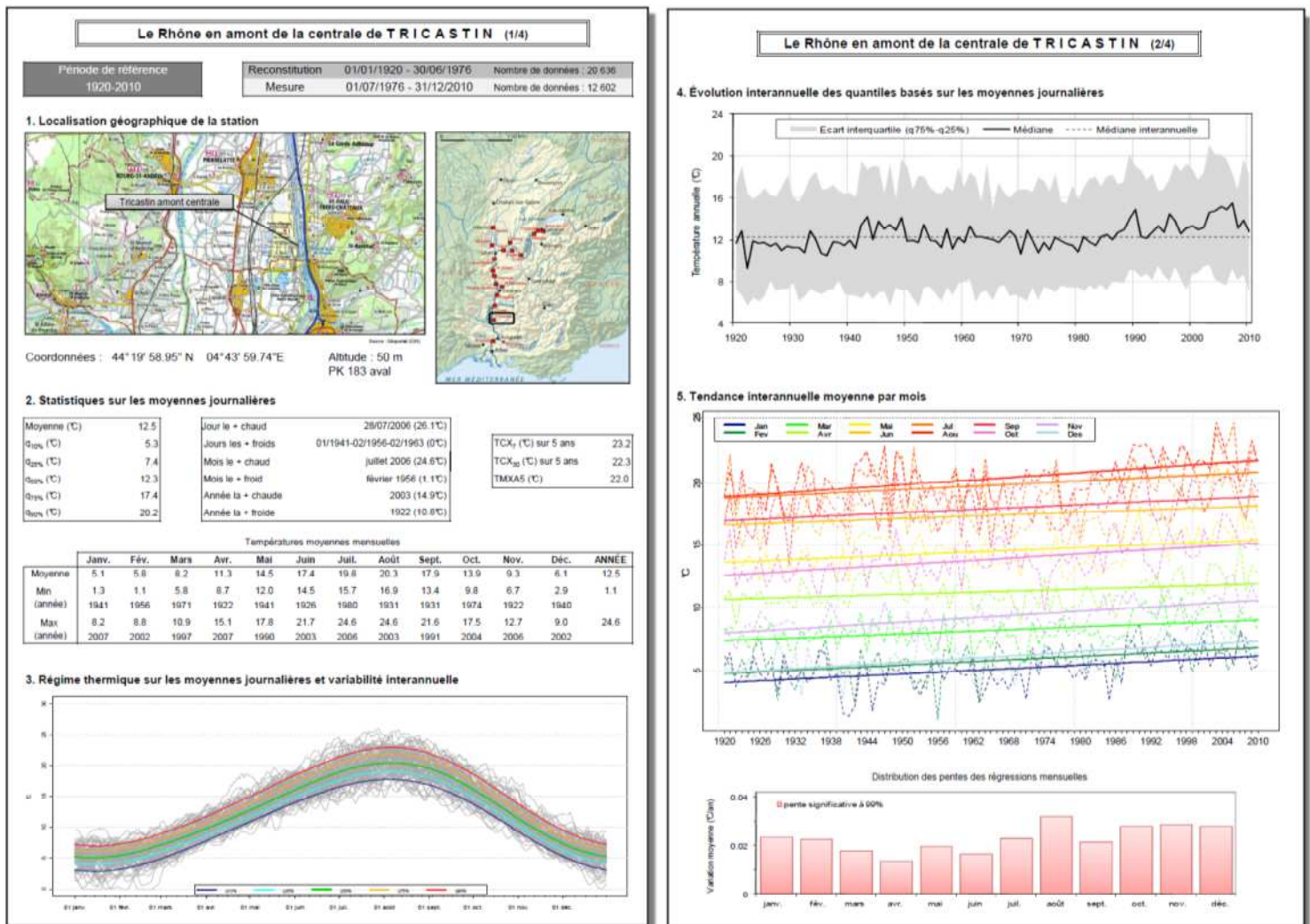


Figure 1. Extrait d'une fiche de synthèse thermique

¹ Dans le cas où la station est située à proximité d'un CNPE, elle correspond à l'amont du CNPE éponyme.

Une hydrologie en évolution

A l'échelle annuelle, les apports en eau du bassin versant du Rhône ne montrent pas d'évolution tendancielle significative depuis 1920. Par contre, à l'échelle saisonnière, des évolutions marquées des débits du Rhône sont observables, avec une diminution des débits en été (-30%) et une augmentation des débits hivernaux (+30%). Cette évolution est marquée par une période charnière située dans les années 1960. Ces effets sur le régime hydrologique du Rhône sont visibles jusqu'à Beaucaire mais sont de moins en moins marqués en s'éloignant du Lac Léman.

Ces modifications des régimes hydrologiques du Rhône sont concomitantes à la période d'aménagement hydraulique du Rhône et de son bassin versant, entre les années 1950 et les années 1970. Par ailleurs, à l'échelle hebdomadaire, les chroniques montrent une gestion hydraulique nettement plus dynamique du Lac Léman depuis les années 1990, avec des débits très faibles pendant le week-end par rapport au reste de la semaine.

Des températures du Rhône et de ses affluents de plus en plus chaudes, notamment en été

À l'exception de l'Arve, toutes les séries de températures analysées témoignent d'une hausse (de 0.4°C à Pougny à 2.1°C à Tricastin) des températures moyennes annuelles sur la période [1920-2010], avec un maximum sur le Bas-Rhône et sur la Saône (1.6°C). Cette augmentation est nettement plus importante pendant les mois d'été (e.g. en août, 3.7°C à Aramon). L'année 1987, identifiée dans la littérature comme date de rupture dans les séries de températures de l'air en France, correspond également à une période charnière dans les températures du Rhône. Avant 1987, on n'observe pas de tendance marquée mais des successions d'années chaudes (e.g. décennie [1940-1949]) ou froides (e.g. décennie [1977-1987]). Depuis 1987, presque toutes les années font partie de ces années chaudes. L'évolution séculaire (sur la période [1920-2010]) de la température de l'eau n'a pas été linéaire mais portée quasi-intégralement par la hausse des températures entre [1988-2010].

Cette hausse des températures se traduit sur les indicateurs utilisés en écologie, par exemple par une hausse des SDJ (>12°C) depuis 1987, notamment sur le Rhône aval (e.g. +30% à Aramon).

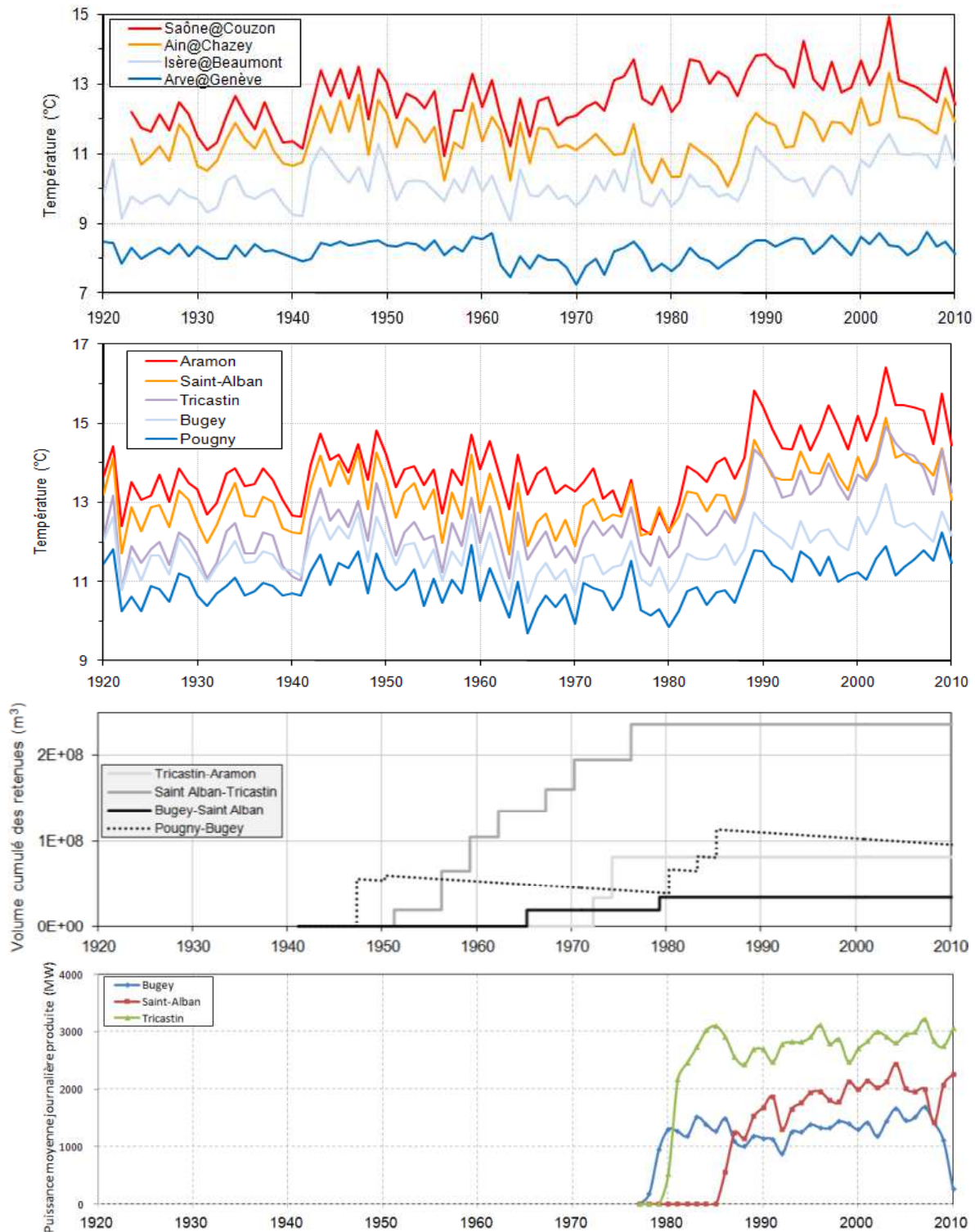


Figure 2. Évolution des moyennes annuelles de la température de l'eau [1920-2010], et des chroniques de puissance de CNPE. Sources des données de température : [1920-1976] : données modélisées; [1977-2010] : mesures

Les aménagements anthropiques en partie à l'origine de cette évolution

L'examen des différences entre les simulations, avec et sans rejets thermiques des CNPE, sur la période [1988-2010] (*i.e.* post-rupture climatique et avec des rejets thermiques des CNPE « stationnaires ») met en évidence, un échauffement résiduel du Rhône lié aux rejets des CNPE, en moyennes annuelles, de 0.5°C à Amont Saint-Alban, 0.6°C à Amont Tricastin et 1.2°C à Amont

Aramon. Pour les températures « chaudes » (quantile 95%, soit 5% les plus élevées de l'année), les rejets des CNPE participent à leur augmentation, à hauteur de 0.7°C à Saint-Alban (Figure 3), 0.8°C à Tricastin et 1.6°C à Aramon.

En comparant les températures « les plus chaudes » de cette période récente (avec « rejets thermiques ») avec celles de la période [1920-1976], l'augmentation des températures s'élève à 1.6°C à Amont Saint-Alban, 2.1°C à Amont Tricastin et 2.6°C Amont Aramon; alors qu'en les comparant à la période intermédiaire « sans rejets thermiques » [1977-1987] (cf.ETRP2), cette élévation est respectivement de 2.4°C, 2.6°C et 3.6°C. La part de la contribution (flèche bleue dans le graphique ci-après) des rejets thermiques des CNPE à l'élévation globale des températures du Rhône (flèches noires) dépend donc étroitement du lieu et du choix de la période de référence pour la comparaison avec les températures récentes [1988-2010].

Par ailleurs, les rejets thermiques des CNPE sont à l'origine d'une précocité des cycles annuels de température (dépassement du seuil à 12°C) de 3 (Amont Saint-Alban) à 8 jours (Amont Aramon).

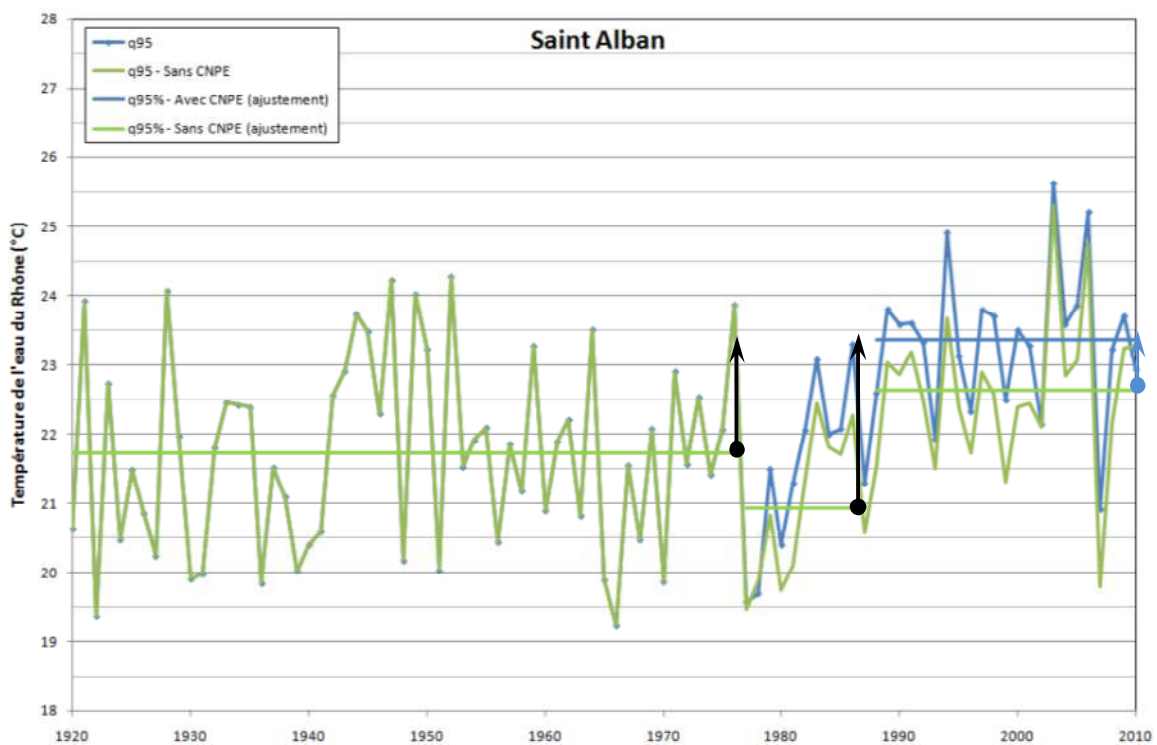


Figure 3. Évolution des températures les plus élevées de l'année (q95%) en simulant l'absence de rejets thermiques des CNPE (les flèches bleues indiquent

Depuis une période charnière située dans les années 1960, le régime hydrologique du Rhône a sensiblement été modifié, notamment par la mise en service de grandes retenues (côté français et côté suisse) à l'échelle du bassin versant. Les débits moyens ont ainsi augmenté d'environ 30% en hiver et diminué de manière comparable en été. Par ailleurs, l'ensemble des retenues situées sur le cours du Rhône ont un effet sur le régime thermique du fleuve, qui dépasse rarement 0,5°C sur la sa partie française. Ces retenues jouent un rôle tampon (lissage) caractérisé par une baisse de la variabilité des températures et par une hausse des températures hivernales (<0.4°C en médiane mensuelle). En été, les effets sont variables suivant les stations ; le refroidissement étant le plus marqué à Saint-Alban (médiane mensuelle : 0.6°C). Par ailleurs, l'analyse des quelques chroniques très anciennes de températures (années 1870) disponibles montre que les processus d'échange

entre l'air et l'eau ont été modifiés par des effets anthropiques multiples parfois antagonistes. A Lyon, la variabilité intra-annuelle des températures du Rhône a été nettement réduite par augmentation de l'inertie du fleuve. L'anthropisation du fleuve (changement de section, diminution des frottements, ...) a contribué à conserver la température moyenne du fleuve et à abaisser les températures élevées. Ainsi, le Rhône, dans sa configuration des années 1870 (*i.e.* sans aménagement hydraulique notoire), aurait été environ 1°C plus chaud avec les conditions hydro-climatiques rencontrées lors de la canicule de 2003.

A retenir

Depuis 1920, les températures du Rhône ont fluctué, avec des périodes plutôt chaudes (1940-1950 ; 1987-2010) et des périodes plutôt froides (1920-1930 ; 1970-1980). Depuis 1987, une tendance très significative à la hausse est notée sur les températures de l'eau, aussi bien sur le Rhône que sur la plupart de ses affluents. Cette hausse est plus marquée en été et sur le cours aval du fleuve (>3°C à Aramon en été). Les rejets thermiques des CNPE contribuent à augmenter la température annuelle du Rhône, de 0.5°C à Amont Saint-Alban, 0.6°C à Amont Tricastin et 1.2°C à Amont Aramon et les températures les plus chaudes respectivement de 0.7°C, 0.8°C et 1.6°C.

Les évolutions climatiques récentes et les aménagements hydrauliques (et leur gestion associée) constituent les autres facteurs expliquant cette évolution des températures du Rhône. Depuis une période charnière située dans les années 1960, les débits du Rhône ont augmenté d'environ 30% en hiver et diminué de manière comparable en été, en lien avec la mise en service de barrages-réservoirs sur le bassin versant (côté français et côté suisse). La modification de la section du fleuve (à partir du XIXe s.) et l'aménagement de retenues sur le linéaire du Rhône de barrages ont également modifié le comportement thermique du fleuve.

3.2. QUELLE EST LA RELATION ENTRE L'HYDROLOGIE ET LA TEMPÉRATURE DU RHÔNE, ET NOTAMMENT EN QUOI LA GESTION HYDRAULIQUE DU RHÔNE SUISSE ET DES AFFLUENTS INFLUENCE LES FACTEURS ÉCOLOGIQUES À BAS DÉBITS ?

L'objectif est d'évaluer l'effet d'une gestion hydraulique différente sur la température du Rhône, à partir d'une meilleure caractérisation du fonctionnement thermique du fleuve et du lien entre débit et température de l'eau.

Le Rhône, un vecteur thermique fonction de l'hydrologie

L'analyse des longues séries de données apporte de nouvelles connaissances sur le fonctionnement thermique du fleuve et notamment sur l'influence forte des débits et de leur gestion sur les températures de l'eau. Le transfert de débit s'effectue en une journée environ entre le Léman et le delta du Rhône alors que le transfert thermique est beaucoup plus lent puisqu'il dépend du temps de résidence des masses d'eau ; il est compris entre 5 jours (en crue, à 2500 m³/s) et 15 jours (à l'étiage, 700 m³/s). Ceci implique que les actions qui pourraient être entreprises au niveau de la gestion débitométrique du Léman pour influencer la température à l'aval auront un temps de réponse d'une dizaine de jours et devront perdurer plusieurs jours consécutifs pour espérer un effet significatif à l'aval éloigné. De manière grossière et simplifiée, 2/3 des variations de température de l'eau amont se conserve à l'aval, sur les tronçons Pougny/Bugey et Bugey/Saint-Alban. Entre Pougny et Aramon, environ 18% d'une baisse éventuelle de température à Pougny se conserverait à Aramon.

Les retenues et leur gestion, un effet limité sur les températures de l'eau

L'incidence globale des retenues (liée à leur simple présence et à leur gestion hydraulique associée) situées sur la partie française du Rhône a été mise en évidence, avec une intensité limitée à quelques dixièmes de degrés. De façon générale, l'étude met en exergue le rôle tampon (lissage des effets) des retenues, avec une baisse des températures en été et une augmentation en hiver. Dans certains cas particuliers, les effets des retenues peuvent être différents (e.g. Bugey).

Les différents types de leviers hydrauliques

L'augmentation du débit du Rhône en sortie du Léman ou par l'intermédiaire des principaux affluents aurait un double effet sur la température de l'eau du Rhône à l'aval : (i) un effet « direct » qui conduit à diminuer la température de l'eau par apport complémentaire d'eau si elle est plus froide que le Rhône ; (ii) un effet « indirect », visible à l'aval des rejets thermiques des CNPE en circuit « ouvert », par dilution du rejet dans un débit plus important du Rhône, et d'autant plus important que le CNPE fonctionne à « pleine puissance ».

Le Léman, un levier hydraulique pour modifier la température du Rhône ?

Sur le Léman, certaines simulations ont permis de quantifier la sensibilité d'une variation du débit en sortie Léman sur la température de l'eau plus à l'aval. En été, une augmentation du débit en sortie Léman provoque, par effet direct, une diminution de la température à Amont Bugey de 0.002°C par m³/s de débit supplémentaire. Par exemple (et sans présager de ce que pourrait être les débits supplémentaires en sortie Léman), une augmentation de 50 m³/s diminuerait la température du Rhône à Amont Bugey de 0.1°C par effet direct et de 0.4°C par effet indirect (par dilution, à Aval Bugey).

Les affluents, des leviers avec une efficacité contrastée

L'Arve apparaît être le levier le plus efficace pour baisser la température de l'eau du Rhône en période estivale car d'une part son eau est très froide en été en lien avec la fonte nivo-glaciaire et d'autre part son effet s'exprime sur tout le cours du Rhône.

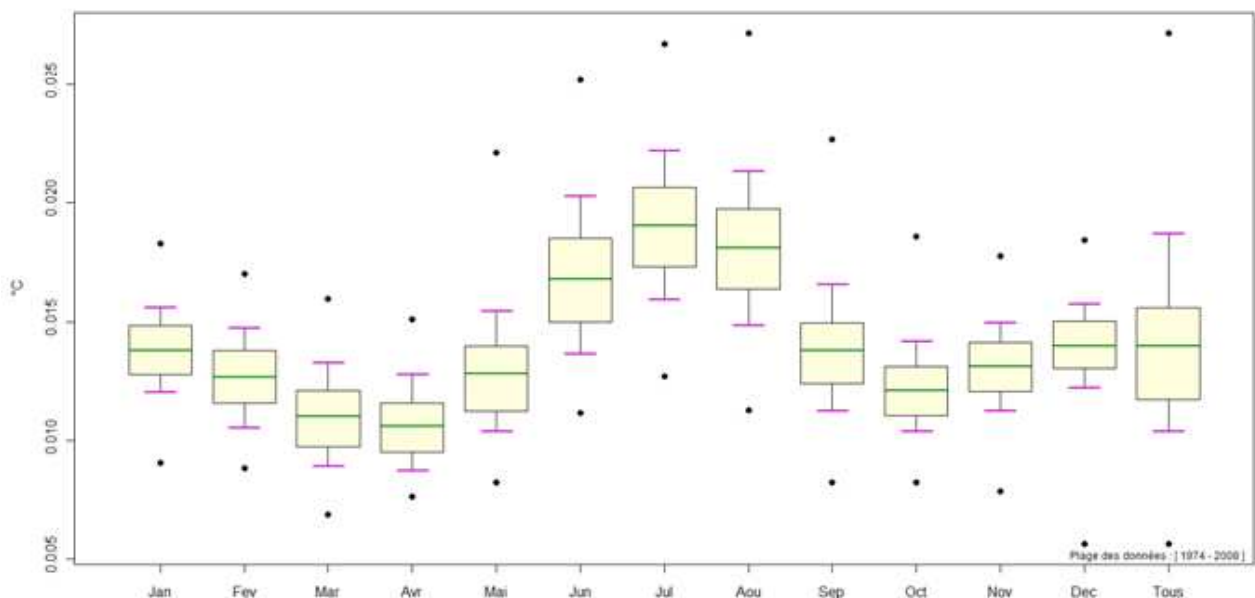


Figure 4. Incidence (effet direct) d'une augmentation unitaire (1 m³/s) des débits de l'Arve sur la température de l'eau du Rhône à Pougny (une incidence positive indique un refroidissement)

A Pougny, une augmentation des débits de l'Arve de 1 m³/s permettrait de diminuer directement les températures de l'eau estivales de 0.015°C (Figure 4), en sachant que deux tiers de cette baisse se conservent à Bugey. L'Isère constitue un levier plus limité (0.0025°C par m³/s supplémentaire pour l'effet direct) pour diminuer la température de l'eau à Tricastin, sauf à mobiliser plusieurs dizaines de m³/s de façon prolongée. La température de l'eau de la Durance est en moyenne plus froide de 3°C que celle du Rhône. Mais compte tenu des débits importants du Rhône sur son cours aval, la température du Rhône est peu sensible à une augmentation de débit de la Durance (0.002°C par m³/s). Pour ces affluents, l'effet « indirect » est d'intensité comparable à celui de l'effet « direct ».

La hausse des débits réservés, un levier pour baisser la température du Rhône ?

Une analyse de l'effet de l'augmentation des débits réservés a été menée sur le RCC de Péage-de-Roussillon, RCC le mieux instrumenté, en ce qui concerne la température de l'eau. Les résultats montrent qu'en été, l'augmentation des débits minimum à 51 m³/s (1/20^{ème} du module) aurait tendance à augmenter très faiblement (< 0.1°C) la température de l'eau en entrée du RCC, par entraînement plus important du panache de rejet de Saint Alban. En sortie du RCC, les échanges avec l'air réduits par un temps de transfert plus court et une hauteur d'eau plus élevée conduiraient à une baisse très faible des températures sur le Rhône aval (<0.05°C). Sur le RCC de Baix, les suivis ont montré que la stratification de la retenue amont entraîne un apport d'eau nettement plus froide dans le RCC. Cette eau se réchauffe ensuite plus facilement avec les faibles débits. Seule une modélisation hydraulique complexe ou un essai permettrait de s'assurer qu'une augmentation du débit réservé conserverait bien cette stratification.

A retenir

Le débit influence la température de l'eau en modifiant le temps de transfert des masses d'eau d'amont en aval. À haut débit, le transfert rapide de l'eau limite le temps d'échange entre les masses d'air et les masses d'eau et dilue les rejets des CNPE. Les analyses de sensibilité (ou marginalistes) conduites sur les relations entre débits et température de l'eau du Rhône et de ses affluents froids quantifient la force des leviers utilisables : les incidences (effets directs et indirects) sur les conditions thermiques sont comprises entre 0.0055°C (Isère) et 0,025°C (Arve) par m³/s supplémentaire (différents suivant les affluents). En situation « chaude », seule l'activation synchrone de plusieurs leviers à des niveaux importants (plusieurs dizaines de m³/s supplémentaires chacun) permettrait d'arriver à un effet thermique de l'ordre du degré Celsius.

3.3. QUELLES SONT LES AMPLITUDES JOURNALIÈRES DE LA TEMPÉRATURE DU RHÔNE ?

Compte tenu de sa morphologie particulière (forte pente, profondeur importante), les échanges thermiques avec l'atmosphère sont plus limités pour le Rhône que pour d'autres grands cours d'eau. Cela limite également les variations jour/nuit de la température de l'eau. Le phénomène de « goutte froide » provenant du Léman est également spécifique au Rhône, et va contribuer, avec la gestion hydraulique des barrages, à propager vers l'aval ces variations de température. En ce sens, les principales variations journalières des températures de l'eau du Rhône sont beaucoup plus complexes que celles d'autres fleuves où elles sont sous les contrôles exclusifs des cycles nyctéméraux de température de l'air.

Variations infra-journalières du débit

Sur la base des débits horaires disponibles sur la période [1991-2010], les amplitudes relatives (par débit unitaire) journalières des débits ont été caractérisées, afin de pouvoir comparer leur variabilité longitudinale sur le linéaire du fleuve. Les débits du Rhône varient de façon très importante à l'exutoire du Léman, à l'échelle hebdomadaire (débits plus faibles le week-end) mais également journalière, en lien avec la gestion hydraulique au barrage du Seujet (Genève). Plus à l'aval, à partir de la station de Lagnieu, les amplitudes relatives sont plus modérées, comparables jusqu'au delta, et donc *a priori* en lien avec la gestion synchrone des ouvrages hydrauliques. Par ailleurs, les analyses menées n'ont pas mis en avant de saisonnalité marquée dans les amplitudes journalières des débits.

Les amplitudes thermiques journalières du Rhône

A Pougny, les amplitudes journalières sont les plus importantes et atteignent en moyenne sur l'année 0.34°C, ce qui reste faible au regard d'autres fleuves français comme la Loire (1.4°C en moyenne à Avoine). Ces amplitudes sont plus faibles sur le Bas-Rhône, puisqu'à partir de Saint-Alban, les amplitudes moyennes sont de l'ordre de 0.20°C. On note ainsi une variabilité longitudinale de l'amplitude journalière des températures de l'eau du Rhône (Figure 5). Ces amplitudes journalières suivent un régime annuel marqué par des amplitudes maximales en été. Les graphiques suivants illustrent la présence conjuguée des deux principaux phénomènes structurant la température de l'eau du Rhône : les échanges d'énergie air-eau (plus faible en hiver) et les transferts amont-aval (visibles avec les gouttes froides).

L'été, les gouttes froides sont plus fréquentes et surtout plus intenses, puisqu'elles peuvent être à l'origine d'amplitudes journalières de la température de l'eau de plusieurs degrés (q99%=2.3°C en juillet et août).

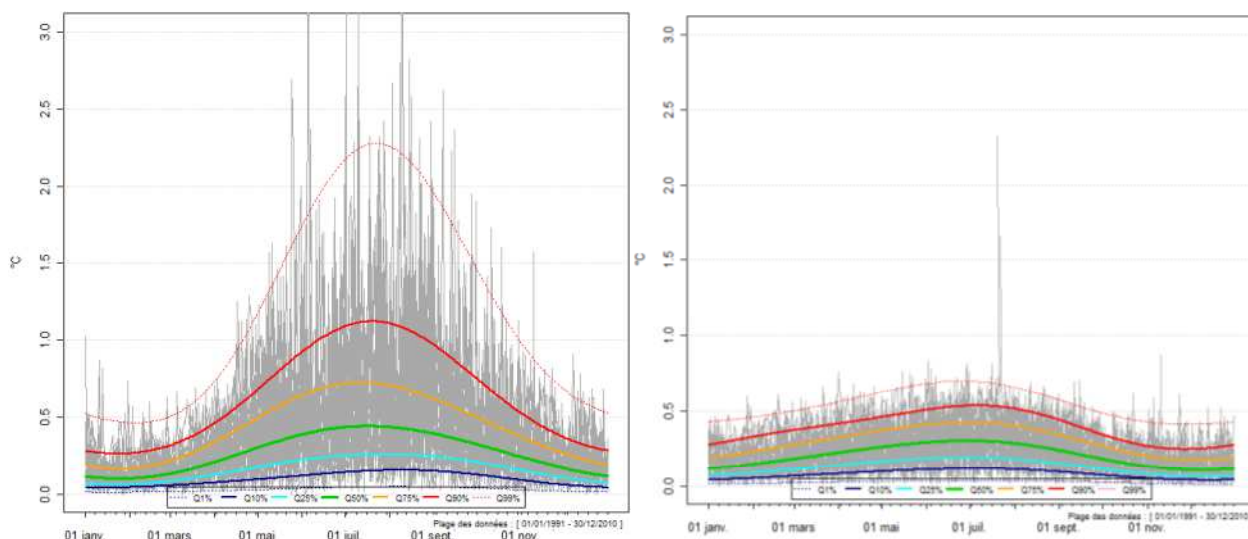


Figure 5. Régime saisonnier des amplitudes thermiques à Pougny (à gauche) et à Amont Tricastin (à droite)

Par ailleurs, même si les chroniques sont relativement courtes, il a été possible de mettre en évidence une tendance à la hausse des amplitudes journalières de température de l'eau sur le Haut-Rhône et principalement visible sur la période estivale (~ 20 % d'augmentation entre 1991 et 2010).

Y a-t-il un lien entre les amplitudes journalières de température et le débit ?

Pour mieux comprendre l'origine des variations de températures de l'eau, les températures de l'eau ont été analysées au regard des débits du fleuve (Figure 6).

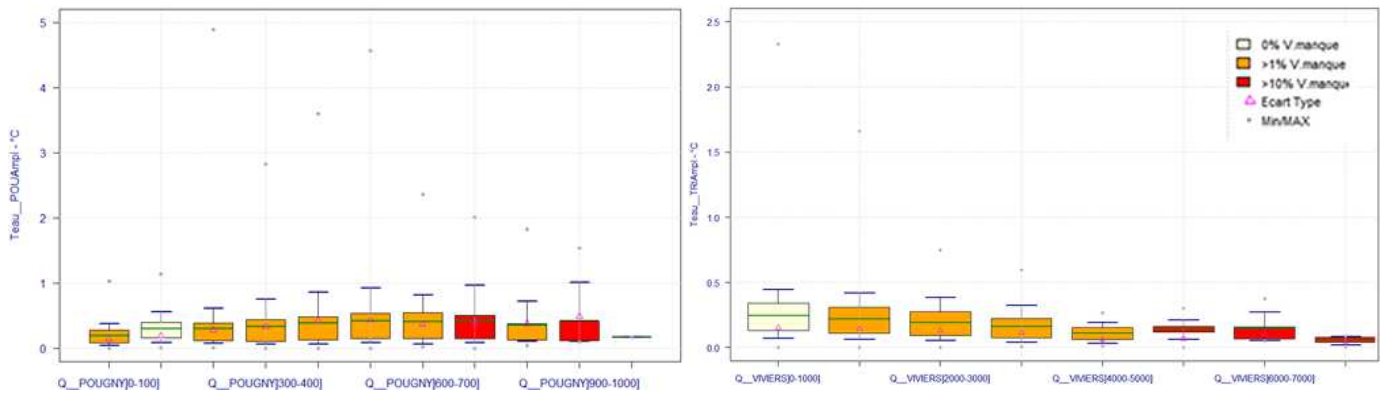


Figure 6. Distribution des amplitudes thermiques journalières en fonction des débits, à Pougny (à gauche), et à Tricastin (à droite)

A Pougny, les amplitudes augmentent lorsque les débits passent du débit d'étiage au débit de hautes eaux. A Pougny, le régime annuel des gouttes froides structure la relation débit/amplitude des températures de l'eau, d'où une augmentation des amplitudes journalières avec les débits. Plus à l'aval, ce phénomène est nettement moins structurant et devient secondaire par rapport aux échanges d'énergie air-eau. A l'aval de Bugey (e.g. Tricastin), une baisse significative des amplitudes journalières de température en fonction des débits est notée illustrant le caractère plus convectif (et donc conservatif pour les températures) du fleuve, à fort débit.

A retenir

Les amplitudes journalières de la température de l'eau du Rhône sont faibles comparées à d'autres fleuves. Elles sont en moyenne de l'ordre de 0.3°C avec une variabilité longitudinale et saisonnière d'environ $\pm 0.2^\circ\text{C}$. Excepté dans la partie amont du Haut-Rhône où la température de l'eau est très influencée par les « gouttes froides », les amplitudes journalières de température du Rhône sont principalement liées aux écarts de température air-eau, et à sa gestion hydraulique associée.

3.4. LA HAUSSE DE TEMPÉRATURE CONSTATÉE A-T-ELLE UNE INFLUENCE SUR LES ESPÈCES INTRODUITES ET/OU ENVAHISSANTES ?

Sur le Rhône, l'examen des longues chroniques de suivis biologiques met en évidence la part croissante des espèces allochtones. L'examen de l'évolution temporelle de la distribution spatiale d'une sélection d'espèces, en particulier de poissons et de crustacés, a permis de préciser les effets globaux de l'augmentation de la température de l'eau sur la répartition de ces espèces.

Un nouveau référentiel

Afin de rendre plus objectif les modifications des aires de présence des espèces aquatiques dans le Rhône et ses affluents, il était apparu nécessaire, à l'issue de l'ETRP3, de définir un état des lieux de référence. C'est dans ce cadre que les informations géo-historiques portant sur une sélection de taxons rhodaniens ont été synthétisées sous forme d'un atlas cartographique.

Les données disponibles ont été rassemblées et structurées à l'intérieur d'une base de données développée spécifiquement dans le cadre de l'ETRP4. Celle-ci permet de visualiser la distribution de 130 espèces (45 macroinvertébrés, 25 macrophytes et 60 poissons). Ces informations synthétiques sont aujourd'hui disponibles sur le Rhône et ses principaux affluents, découpés en 15 tronçons, et pour les 7 périodes temporelles définies depuis le début du XIX^e siècle jusqu'à la période post-canicule 2003 (Figure 7).

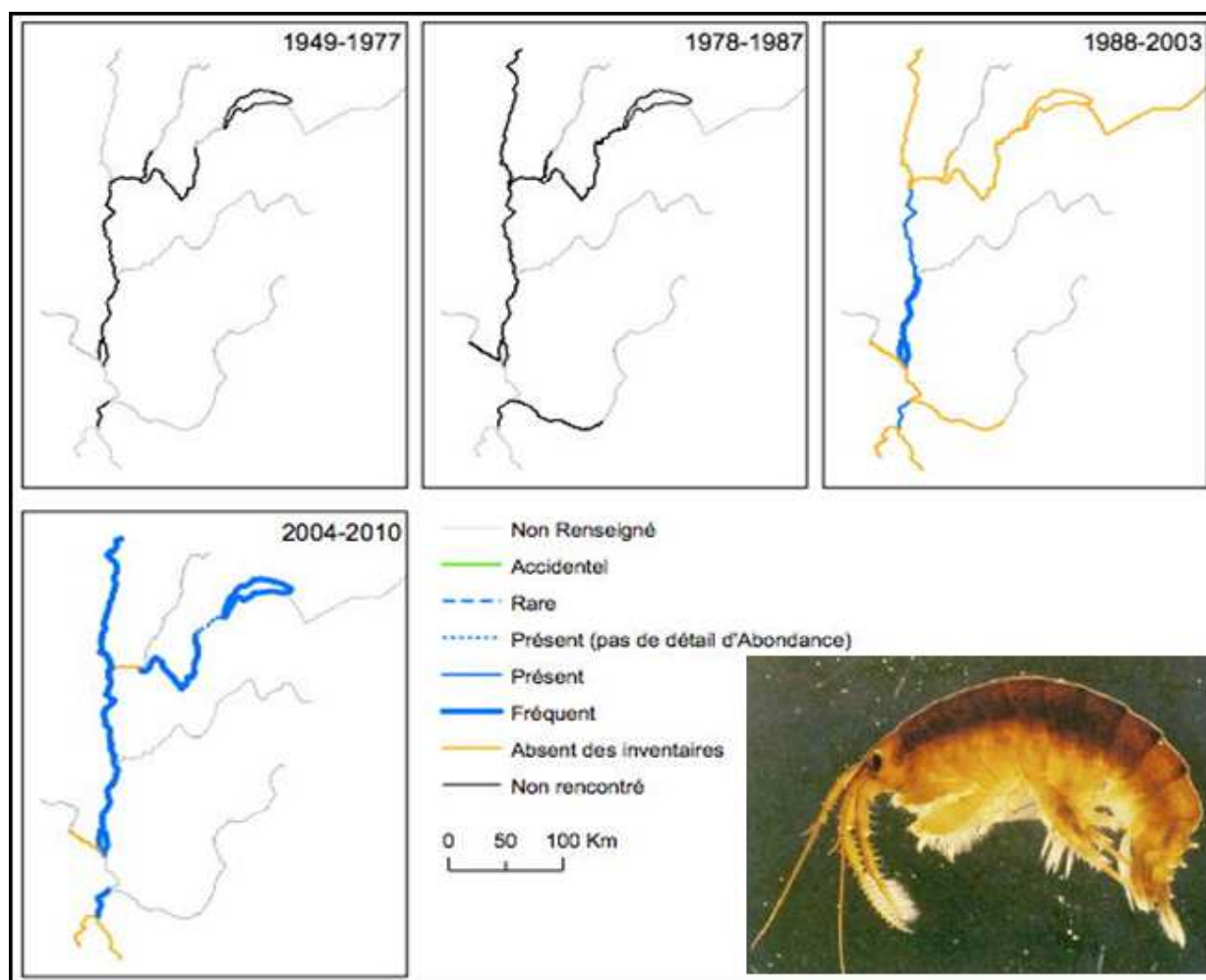


Figure 7. Exemple de fiche extraite de l'atlas pour l'espèce *Dikerogammarus villosus* (les périodes temporelles les plus anciennes ne sont pas mentionnées pour cette espèce récente sur le Rhône)

Des tendances évolutives

L'examen de l'atlas cartographique fait émerger diverses modifications de la distribution des espèces aquatiques, également associées à l'apparition de nouvelles espèces :

1. Des espèces allochtones anciennes tendent à « régresser » (e.g. le poisson-chat, les dreissènes, l'élodée du Canada) alors que les plus récentes accroissent leurs effectifs (e.g. le silure, les corbicules, l'élodée de Nuttall),
2. Une augmentation des effectifs des espèces allochtones au détriment des espèces autochtones (ou intégrées) est enregistrée (e.g. des crustacés *Dikerogammarus villosus* vs *Asellus aquaticus* et *Gammarus fossarum*),
3. Une diminution des effectifs des taxons rhéophiles des sections médianes et aval des cours d'eau (espèces potamiques) est notée en lien avec l'évolution des conditions mésologiques (température, vitesse, substrat,...), e.g. le mollusque *Theodoxus fluviatilis*, l'éphémère *Baetis rhodani*, le trichoptère *Hydropsyche modesta*. A l'inverse, des espèces plus lénitophiles se développent dans ces zones potamiques (e.g. l'éphémère *Caenis luctuosa*, le trichoptère *Ecnomus tenellus*).

Les crustacés, des marqueurs de cette évolution thermique ?

Les populations de **crustacés** ont été étudiées de façon approfondie dans l’environnement du CNPE de Saint-Alban, constituant un site-atelier reproduisant localement des contrastes de températures (amont vs aval rejet) et de débits (retenue vs chenal vs RCC).

Crustacés St-Alban 1985-2011	Date de 1ère capture et origine des espèces invasives
Mysidacés	
<i>Hemimysis anomala</i>	2003 - Ponto-caspien
<i>Limnomysis benedeni</i>	2009 - Ponto-caspien
Amphipodes	
<i>Crangonyx pseudogracilis</i>	1995 - Amérique Nord
<i>Gammarus fossarum</i>	
<i>Gammarus pulex</i>	
<i>Gammarus roeseli</i>	< 1985 - Balkans
<i>Gammarus tigrinus</i>	1995 - Amérique Nord
<i>Dikergammarus villosus</i>	1999 - Ponto-caspien
<i>Chelicorophium curvispinum</i>	2002 - Ponto-caspien
<i>Chelicorophium sowinskyi</i>	2011 - Ponto-caspien
Isopodes	
<i>Asellus aquaticus</i>	indéterminée/Sud-Est Asie
<i>Proasellus meridianus</i>	
<i>Jaera istri</i>	2009 - Ponto-caspien
Décapodes	
<i>Orconectes limosus</i>	< 1985 - Amérique Nord
<i>Atyaephyra desmarestii</i>	2000 - Méditerranéen

Figure 8. Liste des crustacés inventoriés depuis 1985 au droit du CNPE de Saint-Alban

Compte tenu de leur durée de vie et de leur mobilité réduite (en dehors de leurs transports liés aux bateaux) comparativement aux poissons, les crustacés constituent un **modèle biologique** adapté pour la mise en évidence des changements à moyen terme dans les populations. Les suivis biologiques réalisés depuis 1985 montrent une proportion importante d’espèces allochtones (12/15) parmi les taxons inventoriés, avec une évolution qui s’est accélérée à partir de 2000 (Figure 8). Depuis 2003, les effectifs globaux de gammares allochtones (*D. villosus* et *G. tigrinus*) ont augmenté significativement. Le suivi complémentaire réalisé entre 2009 et 2011 montre que (i) les effectifs des gammares sont moins importants dans la zone échauffée et que (ii) le cycle de développement de *D. villosus* est différent dans cette zone échauffée, comparativement à celui de la retenue amont et du RCC (absence d’arrêt total de reproduction, reproduction plus précoce, croissance plus rapide chez les adultes, ...).

Le fait que ces espèces soient apparues de manière concomitante aux changements environnementaux rend impossible la distinction des effets entre un opportunisme initié par les connexions entre des réseaux hydrographiques jusque là distincts et une expansion favorisée par les changements environnementaux en cours.

Les poissons allochtones, des descripteurs potentiels du changement global

Bien que le nombre d’espèces introduites soit faible comparativement à celui des invertébrés, il représente actuellement 30% de la faune piscicole du bassin versant du Rhône. Sachant que les espèces autochtones, hormis l’esturgeon, sont encore présentes, l’expansion démographique des espèces allochtones se traduit par une progressive augmentation de la richesse spécifique locale. Ces espèces sont pour la plupart tolérantes, et la hausse de leurs effectifs peut traduire des changements significatifs du milieu.

Au cours des dernières décennies, des modifications sensibles sont associées à la part croissante et significative des effectifs de juvéniles, et des petites espèces telles que le pseudorasbora et la bouvière (espèce classée « Natura 2000 ») sur le Bas-Rhône. La contribution des juvéniles semble à la fois liée au succès de la reproduction (précocité de la hausse thermique printanière, prolongation de la période chaude favorable et des périodes d’été soutenus) et une meilleure croissance des jeunes poissons. Ces deux petites espèces allochtones ont des traits biologiques et écologiques propices au succès de leur expansion géographique (protection de la progéniture, croissance rapide, maturité précoce et pontes multiples).

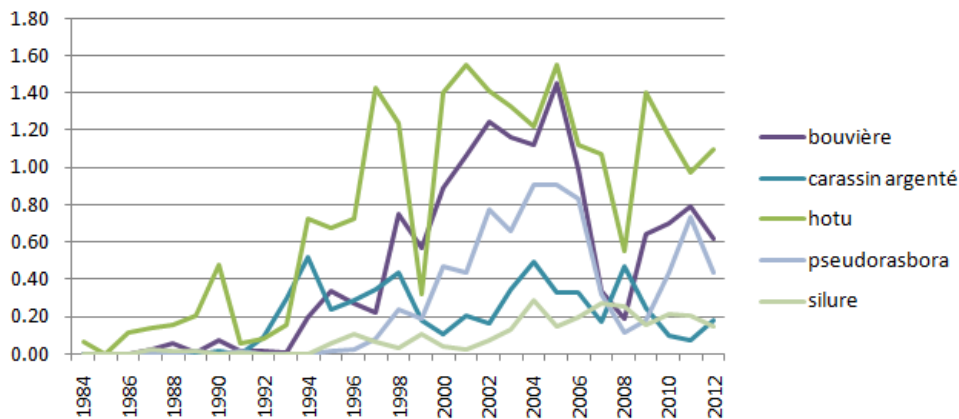


Figure 9. Évolution d'un indice d'effectifs de 5 espèces allochtones échantillonnées, par pêche électrique de rives, sur le cours principal du Rhône (retenue de Montélimar, canal de Donzère-Mondragon, retenue de Caderousse).

Les changements majeurs font suite aux grandes crues de 1993-1994 ayant "nettoyé" le fleuve (Figure 9). Elles ont permis, entre autres, le retour d'espèces lithophiles (utilisant les substrats graveleux pour leur ponte) telles que le hotu dont les effectifs reflètent essentiellement la part juvénile. Mais elles ont également favorisé l'extension de la distribution d'espèces lénitophiles depuis le bassin versant de la Saône telles que le silure, le carassin argenté ou le pseudorasbora.

Les macrophytes, une biodiversité et une dynamique en évolution

De manière identique aux descripteurs précédents, la biodiversité et la dynamique de la végétation aquatique évoluent rapidement depuis le début des années 2000. Ainsi, le recouvrement et la biomasse d'*Elodea nutallii*, espèce allochtone récente (rencontrée pour la première fois à Saint-Alban en 1998) ont dépassé ceux de *Ceratophyllum demersum* et *Myriophyllum spicatum*, espèces autochtones, autrefois dominantes sur le fleuve, voire envahissantes dans certains secteurs.

A retenir

La tendance à l'homogénéisation des habitats thermique et hydrologique du Rhône, en lien notamment avec l'aménagement hydraulique du Rhône, est accentuée par l'augmentation des températures. Cette évolution se traduit par un déclin des espèces dont la niche écologique recouvre en grande partie les conditions d'habitat qui disparaissent, comme les zones froides et courantes, à la faveur de nouvelles espèces aux exigences écologiques moins marquées. Ces espèces étant généralement thermophiles et lénitophiles, la hausse des températures du Rhône contribue au développement d'espèces allochtones souvent envahissantes. Localement, dans les zones où le mélange du rejet thermique des CNPE n'est pas complet, des différences sont observées dans le cycle de développement des crustacés allochtones (e.g. reproduction plus précoce et croissance plus rapide des adultes).

3.5. DANS LA CONFIGURATION PARTICULIÈRE DU RHÔNE, QUELS SONT LES RÔLES RESPECTIFS DES RETENUES/CANAU/TRONÇONS COURT-CIRCUITÉS DANS LA DYNAMIQUE DES POPULATIONS ?

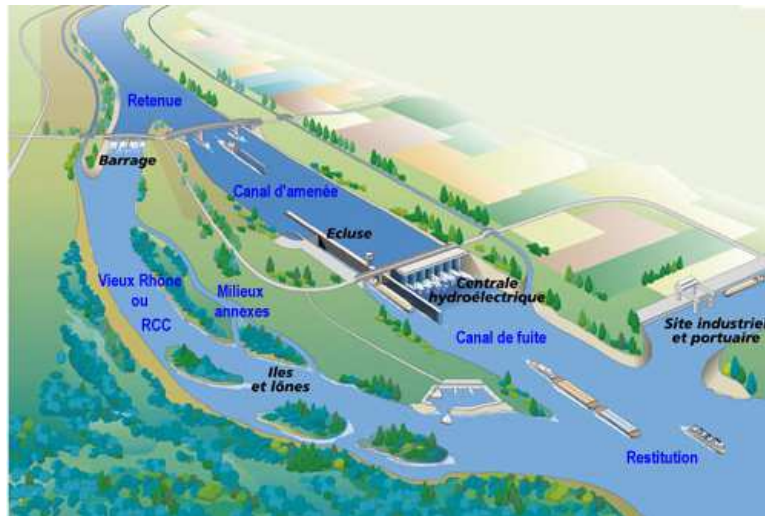


Figure 10. Schéma de principe d'un RCC (CNR, modifié)

Les entités fluviales (retenue, Vieux-Rhône, canaux d'aménée et de fuite, et milieux annexes) en lien avec les aménagements du Rhône possèdent des caractéristiques hydrologiques et thermiques très différentes (Figure 10). Les suivis biologiques et thermiques réalisés à Péage-de-Roussillon et/ou Baix-Logis Neuf apportent des informations nouvelles à propos de l'influence des différents compartiments sur la dynamique des populations d'invertébrés et de poissons.

Des milieux thermiquement et hydrologiquement très contrastés

Les aménagements du Rhône ont contribué à modifier la répartition des habitats thermiques et hydrauliques dans les écosystèmes rhodaniens. Au niveau des tronçons aménagés, les hauteurs d'eau sont nettement plus importantes dans la retenue et le canal d'aménée (> 5 m) que dans le RCC. Sur l'aménagement de Péage-de-Roussillon, le débit dans le RCC était de l'ordre du débit réservé (10 ou 20 m³/s selon les mois) environ 80 % du temps, alors que le module du Rhône s'élève à plus de 1000 m³/s à la station de Ternay.

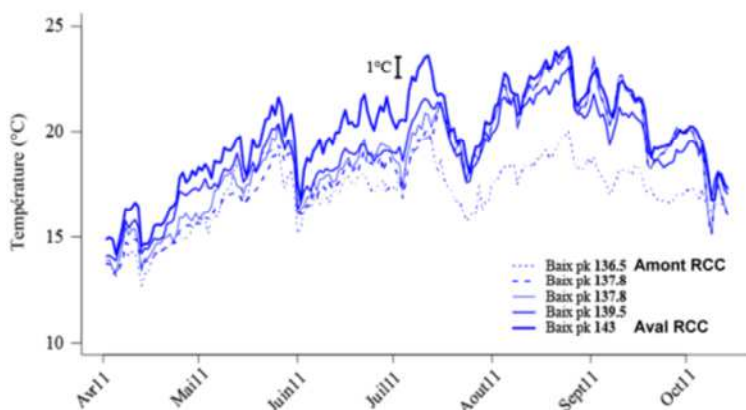


Figure 11. Suivi des températures de l'eau le long du RCC de Baix

Le profil longitudinal thermique du RCC de Péage est relativement homogène, avec des hétérogénéités latérales alors que celui de Baix (Figure 11) varie fortement le long des 7 kilomètres du Vieux-Rhône (réchauffement amont-aval pouvant atteindre 5°C), probablement en lien avec une stratification thermique dans la retenue amont. Les caractéristiques thermiques des Vieux-Rhône apparaissent donc très différentes d'un site à l'autre.

Le rôle des retenues et des parties canalisées sur la biocénose

Même si la composition des peuplements est sensiblement différente (diversité spécifique plus faible dans les retenues), les effectifs de crustacés sont plus importants dans la retenue que dans le RCC, en lien avec une forte proportion de jeunes individus de gammares.

Pour les poissons, les parties canalisées ne sont un lieu de reproduction que pour quelques espèces car la diversité des types de frayères est très limitée et les variations de niveau d'eau peuvent être localement importantes (canaux de fuite).

Le rôle des RCC et des milieux annexes associés sur la biocénose

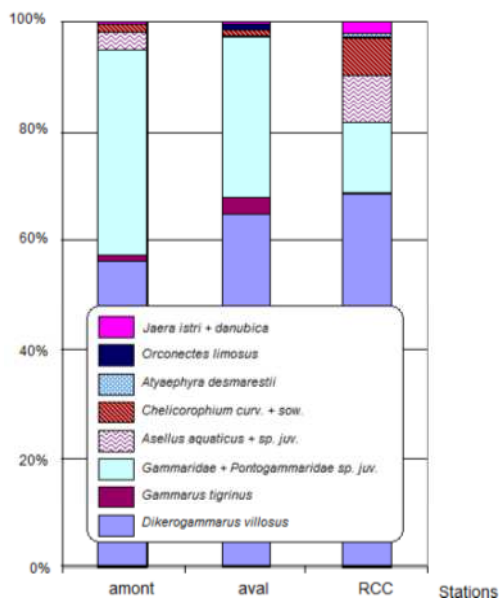


Figure 12. Abondances relatives des crustacés dans le RCC et la retenue de Péage (stations « amont » et « aval »)

L’analyse des **crustacés** du RCC de Péage-de-Roussillon a montré l’existence d’une grande diversité spécifique (Figure 12) avec notamment la présence de nombreuses espèces allochtones avec cependant des effectifs relativement faibles. Les femelles semblent ici moins fécondes par rapport aux parties aménagées, en lien avec une taille relativement limitée des adultes.

En ce qui concerne les **poissons**, les RCC des 2 sites considérés constituent des lieux privilégiés de reproduction pour l’ensemble des espèces de cyprinidés. Ce constat est plus marqué pour les espèces se reproduisant sur des zones courantes comme le hotu. Globalement, la diversité piscicole des RCC est plus élevée que celle des parties canalisées, en lien avec la diversité des habitats.

Dans les **milieux annexes** du RCC de Péage (anciens casiers Girardon), les 3 **espèces piscicoles** dominantes (bouvière, pseudorasbora, perche soleil) représentent plus de 70% des individus. Ces espèces, qui ne sont pas historiquement inféodées au bassin du Rhône, trouvent dans ces milieux généralement lenticques, peu profonds, végétalisés mais également soumis à de fortes variations de leurs caractéristiques physiques (e.g. température, oxygène) des conditions favorables à leur reproduction et au développement des jeunes stades. Ces milieux constituent des habitats complémentaires à ceux du RCC et peuvent offrir ainsi des zones privilégiées de reproduction et de « nurserie » pour l’ensemble du milieu fluvial aménagé. A propos des **invertébrés**, on remarquera que les ¾ des individus échantillonnés sont représentés par des chironomes (insectes) ou des oligochètes (vers), qui jouent un rôle structurant dans le fonctionnement de ces milieux, compte tenu également de leur position intermédiaire dans la chaîne alimentaire. Néanmoins, l’absence d’événements hydrologiques ou thermiques extrêmes durant le suivi ne permet pas de distinguer le rôle respectif de la température et du débit dans le fonctionnement des populations, ni de caractériser l’intérêt de tels milieux en tant que refuges et/ou réservoirs biologiques pour les invertébrés.

A retenir

Les habitats hydrauliques et thermiques des RCC sont conditionnés longitudinalement par les débits réservés y compris les conditions d’alimentation de ce débit (niveau de la prise d’eau dans la retenue, influence éventuelle du rejet échauffé d’un CNPE, ...) et latéralement par la nature et la diversité des annexes. Dans l’équilibre actuel du Rhône aménagé, les RCC et les milieux annexes associés jouent un rôle majeur dans la reproduction et probablement dans la dissémination à grande échelle des juvéniles de poissons, alors que peu de reproduction est observée dans les parties canalisées.

3.6. QUELLE EST LA RÉPARTITION SPATIALE ET TEMPORELLE DES HABITATS HYDRAULIQUES ET THERMIQUE S? COMMENT LES POISSONS UTILISENT-ILS CES HABITATS ?

L'ETRP3 avait mis en avant la nécessité de prendre en compte l'évolution spatio-temporelle des conditions d'habitats hydrauliques et thermiques, pour mieux comprendre l'origine de la distribution des poissons dans le Rhône. Lors de l'ETRP4 le suivi *in situ* par télémétrie acoustique de barbeaux et de chevaines, deux espèces de cyprinidés bien implantées sur le Haut-Rhône (secteur du Bugey) et de silures, espèce en phase de colonisation, associé à l'exploitation d'un modèle numérique hydro-thermique en deux dimensions (Telemac 2D), ont permis de caractériser (1) en 2009 la distribution spatio-temporelle des poissons à une échelle locale (2km de long) en fonction des conditions d'habitat disponibles dans le milieu et (2) en 2010 la mobilité des poissons à plus grande échelle, sur un secteur s'étendant du barrage de Sault-Brénaz à Jons (35 km de long).

Répartition des habitats hydraulique et thermique au droit du CNPE de Bugey

Le modèle hydrodynamique en 2D a permis de décrire les variations d'habitat (conditions hydrauliques et thermiques) en fonction du débit, qui a varié de 150 à presque 800 m³/s lors du suivi 2009 (module à Lagnieu : 470 m³/s) en tout point de la zone. La grande majorité des habitats rencontrés lors de cette expérience était compris dans les gammes suivantes : profondeur de 0 à 3.2 m, vitesse de courant de 0 à 1.4 m/s et température de 14 à plus de 25°C, à l'aval des deux rejets du CNPE de Bugey.

L'utilisation des habitats par les poissons

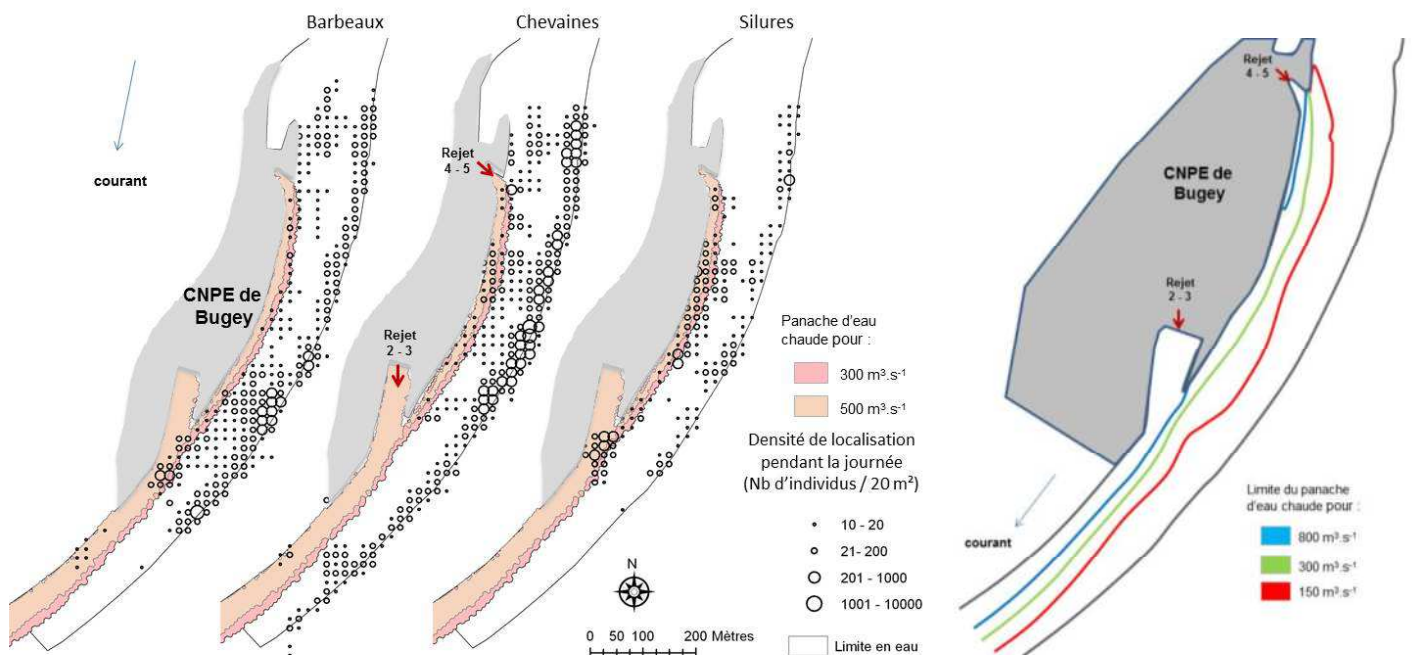


Figure 13. Distribution spatiale des localisations de tous les individus repérés le jour (été 2009), pour des débits compris entre 300 et 500 m³/s (à gauche) et emprises simplifiées du panache d'eau chaude (+2°C par rapport à la température amont) issues du modèle hydrodynamique 2D (à droite)

Durant l'été 2009, une centaine de poissons **adultes** a été marquée et relâchée au droit du CNPE de Bugey. La localisation des poissons en continu par télémétrie acoustique fixe (hydrophones positionnés sur un secteur de 2 km) couplée aux caractéristiques d'habitat fournies par le modèle permet de caractériser finement l'utilisation des habitats par les poissons (Figure 13). Cette expérimentation novatrice à l'échelle d'un fleuve européen tel que le Rhône, montre des

comportements un peu différents de ceux indiqués dans la littérature. Les **barbeaux** sélectionnent majoritairement des vitesses faibles (< 0.6 m/s) associées à des profondeurs faibles (< 0.8 m) à fort débit (> 500 m³/s) ou au contraire des profondeurs très fortes (> 3.2 m) pour des débits faibles à moyens (< 500 m³/s) sans préférence de vitesse. De plus, les barbeaux ne sélectionnent pas les températures supérieures à 25°C. Les **chevaines** exploitent très fortement les profondeurs faibles (< 0.8 m) associées à des vitesses faibles (< 0.2 m/s). Dans le panache d'eau échauffée, les chevaines sélectionnent des profondeurs (< 1.4 m) et des vitesses un peu plus importantes (< 0.8 m/s). Ils utilisent des habitats profonds (> 3.2 m) uniquement à faible débit et leur spectre de préférences est sensiblement plus large lorsque le débit est stable. Les chevaines ne sélectionnent pas les températures supérieures à 23°C. Les **silures** sélectionnent toujours des vitesses faibles à moyennes (< 0.8 m/s) pour la plupart des classes de profondeur. La gamme de température privilégiée des silures s'étale au delà de 23°C. L'ensemble des individus suivis sélectionnent majoritairement des habitats en berge.

Les préférences hydrauliques des trois espèces étudiées se caractérisent par des habitats plutôt **lents** (< 0.2 m/s) et majoritairement **peu profonds** (< 0.8 m). Selon ces préférences, des habitats favorables sont disponibles sur les 2 rives pour les 2 espèces de cyprinidés mais les habitats de la rive droite sont peu utilisés, à cause de la température de l'eau échauffée. En effet, les cyprinidés suivis en 2009 utilisent très peu les habitats dont la température, échauffée par les rejets d'eau chaude du CNPE, est supérieure à 25°C. Enfin, il est important de souligner l'importante variabilité interindividuelle des préférences hydrauliques et thermiques, et notamment chez le barbeau et le silure.

La mobilité des poissons

L'analyse des déplacements des poissons à l'échelle locale montre qu'un débit stable favorise le mouvement des individus, notamment dans le chenal. Dans les phases d'augmentation de débit (barbeau, chevaine, silure) ou de diminution (chevaine), la mobilité des individus est nettement réduite. Les barbeaux et les silures sont peu mobiles le jour alors que les chevaines privilégient les déplacements à l'aurore et dans la journée. A l'échelle hebdomadaire, le suivi par télémétrie acoustique mobile d'une centaine de poissons adultes (différents de ceux de 2009) entre avril et décembre 2010 a montré que les déplacements pluri-kilométriques sont initiés dès que la température de l'eau dépasse 10°C pour les barbeaux et les chevaines et 17°C pour les silures.

Les expérimentations mises en œuvre en 2009 et 2010 ne permettent pas de montrer des changements significatifs de comportement dus à des variations rapides de débit (à l'échelle horaire). Seul le barbeau apparaît moins grégaire ici que dans d'autres sites rhodaniens. Les poissons suivis sélectionnent très fortement les habitats lents et peu profonds qui disparaissent très vite au delà de 300 m³/s, ce qui impose aux différents individus de rester **en berge** la plupart du temps. Par ailleurs, les variations infra-journalières du débit (dépassant généralement 200 m³/s) ne semblent pas empêcher la migration des poissons adultes à l'échelle du tronçon de 35 km même si l'augmentation des marnages depuis la fin des années 1990 a contribué à limiter les habitats favorables disponibles pour les poissons (en augmentant l'intensité de leur variabilité spatiale) et à limiter l'accès aux abris hydrauliques et aux caches le long des berges.

A retenir

Les expérimentations novatrices menées au droit du CNPE de Bugey complètent les connaissances sur les préférences d'habitat d'individus évoluant dans l'environnement rhodanien. A une échelle locale, les habitats sélectionnés sont variables selon les espèces et selon les individus d'une même espèce. Ils sont fonction de l'évolution des débits et de la phase nyctémérale, avec une utilisation privilégiée des eaux échauffées par le silure et un évitement des zones à la température dépassant 25°C par les cyprinidés (barbeau et chevaie). Les déplacements à grande échelle ne se produisent que pour des températures de l'eau dépassant 10°C pour les cyprinidés et 17°C pour le silure. Par ailleurs, tous les poissons suivis utilisent principalement les berges, à la recherche d'habitats lents et peu profonds

3.7. EXISTE-T-IL DES ESPÈCES OU UN ENSEMBLE D'ESPÈCES D'INVERTÉBRÉS TRADUISANT DES EFFETS DES CONDITIONS THERMIQUES ?

Contexte

Les macroinvertébrés benthiques, par leur très grande diversité, présentent une large gamme de réponses aux conditions environnementales et à leurs variations. Ainsi, de nombreuses espèces montrent des préférences marquées vis-à-vis de la température et sont potentiellement de bons indicateurs des conditions thermiques de l'habitat. Peut-on pour autant définir des espèces ou des caractéristiques biologiques et écologiques permettant de décrire les conditions thermiques d'un milieu ? Peut-on alors comprendre les origines des variations observées sur les peuplements du Rhône ces dernières décennies ? Est-il possible de quantifier la part relative des effets de la température parmi les autres facteurs structurants le milieu tel que l'hydrologie ?

Les études menées sur les macroinvertébrés, dans le cadre de l'ETRP4, s'intéressent aux peuplements (globaux ou de Crustacés ; taxonomie et traits bio-écologiques) mais aussi aux populations (espèces de Crustacés les plus abondantes) localisées à proximité des CNPE du Rhône. Les données long-terme annuelles (3 dernières décennies), mais aussi court-terme mensuelles à Saint-Alban (2009-2011), ont été récoltées au niveau de 3 stations : "amont" (amont rejet), "rejet" (son aval immédiat) et soit "aval" (aval éloigné du rejet) pour l'étude du peuplement global, soit "RCC" pour l'étude des Crustacés.

Évolution des peuplements au cours des trois dernières décennies

L'analyse des macroinvertébrés rencontrés dans le Rhône, au cours des 3 dernières décennies, montre l'existence de peuplements différents le long des 3 zones géographiques du Rhône : Haut-Rhône (Bugey), Rhône Moyen (Saint-Alban) et Bas-Rhône (peuplements des sites de Cruas-Meysse et Tricastin très similaires) et une évolution temporelle des peuplements pour ces 3 zones confirmant les résultats de la phase 3. On observe donc une tendance à l'uniformisation des peuplements des 2 zones aval avec, à partir des années 2000, une domination relative des caractères bio-écologiques spécifiques des espèces invasives ou de milieux méditerranéens (thermophiles et plus d'une génération par an, en particulier) sur ceux des espèces natives. Sur le Haut-Rhône, on observe un glissement temporel vers un peuplement caractéristique des zones plus aval des cours d'eau, composé aussi de taxons plus thermophiles mais qui subit moins fortement l'influence des espèces invasives. Le peuplement de Crustacés, observé au niveau du site de Saint-Alban, au cours des 3

dernières décennies, montre les mêmes évolutions que pour le peuplement global : une diminution progressive des espèces natives au profit des espèces allochtones thermophiles et très compétitrices. Sur les 15 espèces rencontrées depuis 1985, seules 3 sont autochtones et 6 espèces allochtones sont apparues depuis 2000.

Variations inter-stations de la composition des peuplements globaux ou des populations de Crustacés

L'analyse long-terme taxonomique ou bio-écologique des peuplements de macroinvertébrés des 4 sites étudiés ne montre pas de différences significatives entre les 3 stations ("amont", "rejet" et "aval") mis à part à Bugey, avec, après 1988, plus de taxons eurythermes et limnophiles à la station "rejet".

Le suivi court-terme (2009-2011) des populations de Crustacés sur le site de Saint-Alban montre, par contre, des effectifs totaux nettement supérieurs à l'amont. Dans les 3 stations, les effectifs sont fortement dominés par les Crustacés allochtones *Dikerogammarus villosus* (adultes et juvéniles) représentant plus de 80% des effectifs totaux. Par ailleurs, *Asellus aquaticus* (2^{ème} taxon le plus abondant et originellement dominant) est en forte régression à l'amont et dans le RCC depuis 2006 et disparaît totalement à l'aval immédiat du rejet à partir de 2010 (conséquence des conditions thermiques à cette station). Enfin, les effectifs de *Gammarus tigrinus*, Crustacé allochtone particulièrement tolérant aux températures élevées en été et aux rapides réchauffements printaniers, sont en proportion plus importants à la station "rejet".

Cas particulier des populations de *Dikerogammarus villosus*

Dans le secteur de Saint-Alban, l'évolution mensuelle des effectifs du Crustacés le plus abondant, *D. villosus*, sur la période 2009-2011, est fortement dépendante des événements hydrologiques et des variations de températures saisonnières. Dans les 2 stations de la retenue ("amont" et "rejet") les effectifs augmentent avec des débits forts et chutent en période d'étiage. De plus, dans ces 2 stations, mais plus nettement en aval immédiat du rejet, les températures de l'eau proches ou supérieures à 20°C coïncident globalement avec les plus bas effectifs globaux. Dans la station "amont", l'évolution des effectifs de cette espèce dépend fortement du recrutement favorisé par des températures clémentes, avec un arrêt de la reproduction en période hivernale et la présence quasi exclusive d'adultes à ce moment de l'année. Dans la station "rejet", la reproduction semble seulement ralentie en hiver, avec la présence de quelques jeunes individus tout au long de l'année. Dans le RCC, l'évolution temporelle des effectifs globaux de *D. villosus* est plus régulière que dans les 2 autres stations et correspond à un cycle de reproduction plus naturel.

En ce qui concerne la structure des populations de *D. villosus*, les tailles des différentes catégories d'adultes, sauf des femelles ovigères, sont plus grandes à l'amont de la retenue et plus petites dans le RCC. A l'aval immédiat du rejet, la plus faible proportion de grands individus témoigne d'un turnover supérieur des individus adultes (i.e. intensité de reproduction, vitesse de croissance et durée de vie) avec l'accroissement de la température et une SDJ plus importante à cette station par rapport aux autres stations, pour une même période.

Conclusion : il est difficile d'identifier des indicateurs thermiques

A l'échelle du Rhône, il est, aujourd'hui difficile de déterminer des taxons permettant de diagnostiquer l'état thermique du milieu. Les peuplements de macroinvertébrés du Rhône

présentent une forte variabilité spatiale et il est impossible de quantifier précisément le rôle des différents facteurs du milieu (dont la température) sur leur évolution temporelle. L'arrivée d'espèces allochtones, notamment dans les secteurs en aval de Lyon, coïncide, par exemple, avec des événements hydro-climatiques ponctuels extrêmes (crues et canicules) qui accélèrent les échanges initiés à l'origine par le développement des liaisons fluviales inter-bassins. Mais l'installation durable de ces espèces est liée, pour partie, au réchauffement de la température de l'eau du Rhône et de ses affluents observé aux cours des dernières décennies (cf. 3.1). De même, à une échelle mensuelle, l'évolution des effectifs de *D. villosus* dans le secteur de Saint-Alban, dépend des variations des débits et des températures (naturelles ou anthropiques) mais aussi du cycle naturel de cette espèce.

Un effet "rejet" est mis localement en évidence sur le peuplement de Crustacés de Saint-Alban avec, par exemple comme modifications d'origine thermique, une reproduction en période hivernale de *D. villosus* et donc la présence de jeunes toute l'année, des tailles d'adultes de cette espèce globalement petites, une disparition des aselles et une bonne implantation du crustacé *G. tigrinus*. Cependant, l'analyse long-terme taxonomique ou bio-écologique des peuplements de macroinvertébrés des 4 CNPE étudiés ne montre pas d'effet "site" au delà de cet effet local. Par rapport à l'ETRP3, la dérive progressive (Figure 14) et la tendance à une uniformisation des peuplements de macroinvertébrés à l'échelle du Rhône se poursuit et s'accroît avec une macrofaune plus tolérante aux conditions de milieu (qualité d'eau, température, hydraulique) et l'apparition de divers taxons allochtones.

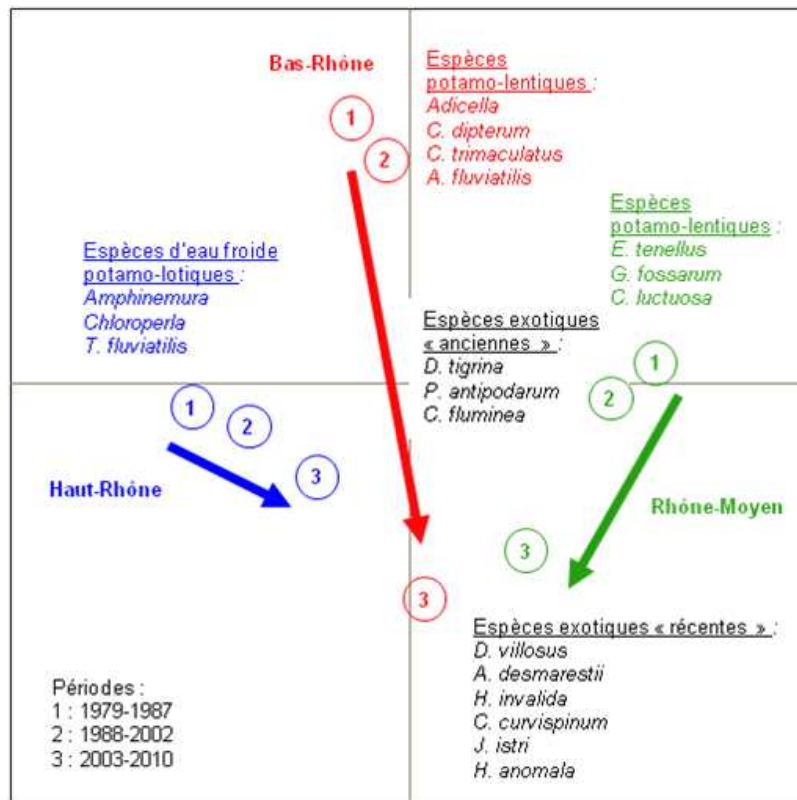


Figure 14. Synthèse de l'évolution temporelle des peuplements de macroinvertébrés du Rhône

Pour chaque site, les prélèvements de chaque période se différencient et s'éloignent de ceux de la période précédente. Ceci est particulièrement marqué sur le Rhône Moyen et le Bas-Rhône. Les dernières périodes de chaque site tendent à converger vers un point commun, signe d'une homogénéisation des peuplements, avec un fond commun d'espèces exotiques dont plusieurs

Crustacés. Parallèlement, les effectifs de taxons autochtones, des espèces d'eau froide potamotiques sur le Haut-Rhône (e.g. divers Plécoptères) et des espèces potamo-lentiques sur le Rhône Moyen et le Bas-Rhône (e.g. Aselles et Gammare autochtones) décroissent fortement, voire disparaissent.

A retenir

Cette étude montre une dérive biologique et écologique complexe des peuplements de macroinvertébrés en lien avec l'évolution du Rhône observée au cours des 30 dernières années. Cependant, ce travail ne permet pas de quantifier l'importance des multiples facteurs de contrôle des changements faunistiques observés (conditions hydro-climatiques, aménagement et gestion du fleuve ou autres pressions exercées sur le bassin versant). La définition d'un outil permettant de diagnostiquer l'état thermique d'un milieu semble difficilement envisageable à partir d'espèces ou de traits bio-écologiques particuliers de macroinvertébrés et devrait plutôt tendre vers la recherche de métriques basées sur l'évolution des proportions de groupes d'espèces et/ou de groupes de traits (*i.e.* profil écologique).

3.8. LA TEMPÉRATURE INFLUENCE-T-ELLE LA CROISSANCE ET LA SURVIE DES ORGANISMES ?

Le Rhône a subi une évolution marquée de son régime hydrologique et thermique ces dernières décennies. Les effets de ces modifications sur les communautés aquatiques sont complexes à mettre en évidence en raison de l'effet conjugué des changements sur les habitats aquatiques et de l'imbrication des échelles temporelles considérées. Ce contexte s'observe notamment sur le Bas-Rhône et le peuplement piscicole majoritairement composé de cyprinidés. Dans ce cadre, l'étude des jeunes stades de cyprinidés au cours de la période critique de leur développement est essentielle pour comprendre la dynamique de ces populations. Il a été proposé d'étudier l'influence de la variabilité thermique et hydrologique (i) sur la taille automnale des juvéniles et (ii) sur la dynamique d'apparition des cohortes de juvéniles afin de mieux comprendre la variabilité du stock de juvéniles en fin d'été.

Croissance des juvéniles

Les données de suivis piscicoles permettent de disposer de chroniques longues sur le système rhodanien et ses principaux affluents (Ain, Saône et Durance) auxquelles des chroniques de température et de débit peuvent être associées. Après une fastidieuse sélection des données, l'étude de la variabilité de la taille des juvéniles de l'année a pu être menée sur deux espèces abondantes : le gardon (*Rutilus rutilus*) et le chevaine (*Squalius cephalus*). La séparation des premières classes d'âge, en particulier des juvéniles de l'année, a été faite *via* une expertise sur la distribution des tailles. L'effet de la température a été examiné par une somme des degrés-jours (SDJ) de la période la plus favorable à la croissance et l'hydrologie selon une métrique basée sur la distribution des débits moyens journaliers.

Les résultats montrent une relation positive entre la taille des juvéniles en fin d'été et la SDJ : un degré-jour de plus amènerait une augmentation moyenne de l'ordre de 3-4 mm. Depuis 1980, la SDJ annuelle n'a cessé d'augmenter par l'allongement de la période où la température est supérieure à 12°C (seuil physiologique communément admis pour les cyprinidés). Cet échauffement conduit à une augmentation de la taille des juvéniles qui s'accroît à partir des années 90. La diminution de la taille imputable aux variations hydrologiques semble être un effet indirect lié à l'abaissement des

températures lors d'épisodes de forts débits. L'écoulement Nord-Sud du Rhône induit un gradient thermique longitudinal important, amplifié par la contribution des CNPE. En réponse à cette structure, la taille des juvéniles est plus faible à l'amont qu'à l'aval. Mais si depuis 2000 la taille augmente assez globalement, entre 1980 et 2000 elle est très variable selon la position longitudinale et les caractéristiques locales des sites.

Sur la période considérée, la taille des juvéniles (en fin d'été) augmente en réponse à l'échauffement global du système rhodanien. Cet échauffement a des origines multiples dont le rôle relatif sur la modification de croissance observée est impossible à différencier. Par ailleurs, d'autres facteurs contrôlent la croissance et sont peu ou pas pris en compte (parasitisme, variation locale de l'habitat...). Enfin, si la taille augmente avec la température, il est difficile d'émettre des hypothèses sur les conséquences sur le fonctionnement et la dynamique des populations.

Dynamique d'apparition des cohortes

Les mécanismes de l'apparition et du maintien des juvéniles agissent à des échelles spatiales et temporelles fines. Une étude a été réalisée dans deux secteurs aménagés (barrages hydroélectriques à dérivation) du Bas-Rhône, dans un contexte hydrologique comparable : Péage de Roussillon (Péage) et Baix-Le Logis-Neuf (Baix). Le premier est échauffé par le rejet du CNPE de Saint-Alban (moyenne journalière RCC en période de pêche = 20°C, comprise entre 10 et 26°C) et le second refroidi par l'arrivée de l'Isère (moyenne journalière RCC en période de pêche = 18°C, comprise entre 10 et 24°C). En 2010 et 2011, des pêches ont été réalisées tous les 15 jours (de mars à octobre) dans les RCC, les canaux de fuite et les zones de restitution. Les températures et les débits enregistrés mettent en évidence d'une part, des variations de débit plus fréquentes en 2010 et à Péage et d'autre part, un échauffement printanier précoce en 2011.

120 000 juvéniles ont été échantillonnés, identifiés et mesurés. En raison de la complexité de la distinction des cohortes sur la seule base de la taille, ce travail a été réalisé pour les quatre espèces les plus abondantes : l'ablette (*Alburnus alburnus*), le chevaine (*Squalius cephalus*), le gardon (*Rutilus rutilus*) et le hotu (*Chondrostoma nasus*). Les résultats (Figure 15) sur les quatre espèces montrent qu'à Péage, comparativement à Baix, l'augmentation rapide de la température en début de printemps engendre des épisodes de reproduction plus précoces et stimule la croissance. Les fortes crues limitent l'abondance des larves, notamment sur les premières cohortes, mais la variabilité observée indique que d'autres facteurs régulent également les effectifs (survie des jeunes stades, prédation...). Les juvéniles pleinement développés ne semblent, quant à eux, plus affectés, par la variabilité hydrologique. Ces données constituent donc une phase d'acquisition de connaissances originales et essentielles dans l'étude de la dynamique des juvéniles dans des secteurs aménagés.

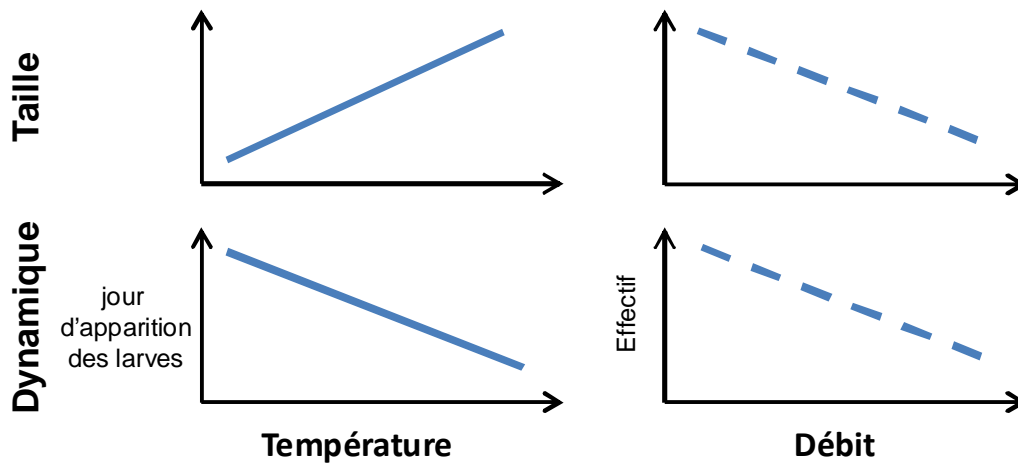


Figure 15. Synthèse schématique des effets de la température et du débit sur la taille et la dynamique des juvéniles (les droites en pointillés représentent les relations qui nécessitent un approfondissement des connaissances).

A retenir

Le régime thermique conditionne en partie le fonctionnement des hydrosystèmes. Dans les systèmes aménagés, les usages du fleuve induisent des modifications de fonctionnement (hydrologique, hydraulique) qui ont une influence sur le lien (direct ou indirect) entre la dynamique temporelle de reproduction et de croissance des jeunes poissons et la température. Les chroniques de suivis piscicoles sur le long terme sont apparues comme des sources de données d'intérêt majeur pour l'étude de ce lien et ont permis d'établir des relations entre la taille des juvéniles en fin d'été et les paramètres thermiques. Cependant, ces données ont été acquises pour satisfaire des objectifs liés au suivi des CNPE (ex : différence amont/aval CNPE, évolution à long terme des structures de peuplements) mais se révèlent peu appropriées pour étudier les mécanismes responsables de la dynamique temporelle des peuplements. Des études complémentaires et des stratégies d'échantillonnage dédiées à des questions précises doivent être mises en œuvre pour mieux comprendre les modalités de régulation et de maintien des populations dans ces systèmes aménagés. **Une acquisition de données précises sur quatre espèces de cyprinidés révèle que la température influence surtout la phénologie de la reproduction et la croissance. Parallèlement, l'hydrologie en complément de processus biologiques (prédation, compétition...), régule les effectifs des premiers stades de développement (larves) au cours des premières semaines post-éclosion.** Les données acquises montrent la complexité des mécanismes de régulation des effectifs et apportent des connaissances sur la biologie des cyprinidés nécessaires pour aborder les questions de dynamique du succès de reproduction et du maintien des juvéniles.

3.9. QUELS SONT LES EFFETS D'UNE AUGMENTATION DE TEMPÉRATURE SUR LES COMMUNAUTÉS MICROBIENNES DU RHÔNE ?

Les communautés microbiennes périphytiques (biofilms, à dominante phototrophe) et sédimentaires (à dominante hétérotrophe) se trouvent à la base de nombreux processus écologiques et elles contribuent au bon fonctionnement des écosystèmes aquatiques du fait de leur rôle prépondérant dans les cycles biogéochimiques. Du fait de leurs temps de génération courts, ces communautés microbiennes sont capables de répondre plus rapidement que les communautés de macro-organismes à des changements environnementaux. Dans ce contexte, il est apparu important, aux scientifiques et aux gestionnaires, d'évaluer les effets potentiels d'une augmentation de la température (en particulier à plus de 30°C) des eaux, dans un contexte estival, sur les processus et la dynamique des communautés microbiennes benthiques échantillonnées dans le fleuve Rhône.

Un bilan des connaissances sur l'effet de la température sur les communautés microbiennes aquatiques

La synthèse bibliographique sur l'effet des températures sur les communautés microbiennes aquatiques met en avant un nombre conséquent d'études traitant de cette thématique, mais souligne la méconnaissance de ce sujet dans le cadre du fleuve Rhône. La plupart de ces travaux met en évidence l'influence directe de la température sur la structure, la diversité et les fonctions des communautés microbiennes aquatiques phototrophes et hétérotrophes. Au niveau fonctionnel, la température exerce à la fois un contrôle distal, qui influence à moyen et long terme la structure de la communauté et un contrôle proximal qui affecte à court terme l'intensité de l'activité métabolique. Quand les températures ne dépassent pas l'optimum thermique des organismes, le contrôle proximal engendre généralement une stimulation des différentes activités microbiennes lorsque les températures s'élèvent. Cependant, dans certaines conditions de milieu et d'échauffement (*i.e.* la Garonne au droit de Golfech), le contrôle distal de la température peut être supérieur au contrôle proximal, confirmant la complexité de réponse des assemblages microbiens et la nécessité d'étudier leur dynamique.

Des prélèvements in situ d'échantillons rhodaniens

Compte tenu des caractéristiques spécifiques au Rhône, dont le lit est à forte composante sédimentaire, 2 types de communautés benthiques ont été étudiées : les communautés périphytiques (biofilms, principalement phototrophes du fait de la dominance des communautés micro-algales et cyanobactéries), et les communautés sédimentaires (principalement composées de bactéries hétérotrophes) de 2 sites, respectivement situés dans le Haut-Rhône (amont du CNPE du Bugey) et le Bas-Rhône (amont du CNPE de Tricastin). Afin d'intégrer une certaine variabilité temporelle, 2 séries d'expériences ont été programmées en considérant des communautés prélevées au début (juillet) puis à la fin (septembre) de l'été 2012. Les effets de la température ont été évalués en microcosmes et à une échelle temporelle compatible avec le cycle de maturation et de renouvellement de ces biofilms en milieu naturel (pendant 3 semaines), en caractérisant l'évolution des conditions physico-chimiques de l'eau ainsi que la dynamique et la réponse fonctionnelles des communautés microbiennes phototrophes et hétérotrophes soumises à des températures élevées (20, 25, 30, 32 et 35°C) alors que la température lors du prélèvement initial était de l'ordre de 20°C.

Des effets notables de la température sur les communautés microbiennes

Cette étude montre qu'aux différentes conditions thermiques de 20°C à 35°C, peut être associée une évolution progressive structurale et fonctionnelle des communautés microbiennes périphytiques et sédimentaires (Figure 16). Bien que l'amplitude de cette évolution ait été variable suivant l'origine des échantillons et la date de l'expérience, il apparaît clairement sur l'analyse multi-variée que l'évolution globale des paramètres physico-chimique et microbien est principalement conditionnée par le niveau thermique. Ainsi, le suivi hebdomadaire des paramètres physico-chimiques a montré une évolution significative des concentrations de certains d'entre eux aux températures les plus élevées (30, 32 et 35°C), avec notamment une augmentation de la conductivité électrique, des nitrates et des silicates et une baisse de l'oxygène dissous.

Des évolutions significatives au niveau du compartiment microbien ont également été observées aux températures les plus élevées. Ainsi, au sein des biofilms périphytiques, la hausse thermique engendre un effet significatif sur la structure des communautés, favorisant le développement des cyanobactéries (dès 30°C) et des chlorophycées (dès 35°C), au détriment des diatomées, sans toutefois affecter fortement la biomasse chlorophyllienne. La structure génétique des communautés microbiennes est également significativement modifiée dès 30°C, dans les biofilms et les sédiments.

La succession algale observée en laboratoire est cohérente avec celle classiquement rencontrée en milieu naturel. La littérature met ainsi en avant que la température sélectionne la composition taxonomique de l'assemblage phytoplanctonique : d'une manière générale, les températures inférieures à 20 °C favorisent le développement des diatomées, les chlorophycées dominent plutôt à des températures comprises entre 15 et 30 °C et le développement des cyanobactéries est favorisé pour des températures supérieures à 30 °C.

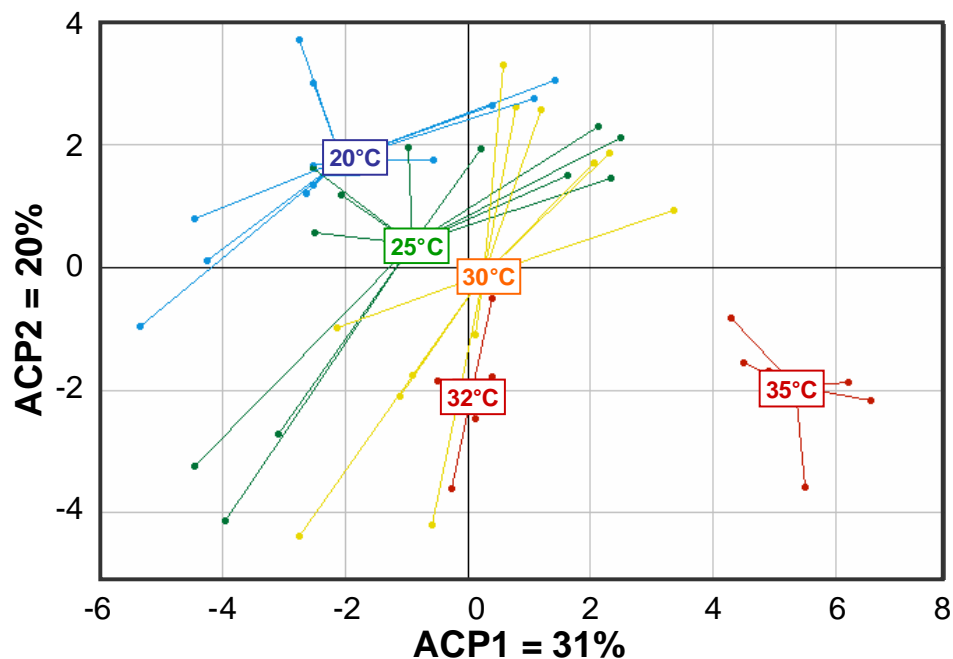


Figure 16. Analyse en Composantes Principales (ACP) des données physico-chimiques et microbiennes après 3 semaines, dans les 4 expériences en microcosmes (i.e. Bugey/Tricastin ; juillet/septembre)

L'activité potentielle de dénitrification par les biofilms est également significativement affectée à la baisse par la hausse thermique (dès 30°C) mais ces effets restent limités du fait du niveau très faible

de cette activité dans le compartiment périphytique. Au sein du compartiment sédimentaire, les températures supérieures à 30°C engendrent une diminution significative du nombre de copies du gène ADNr 16S qui traduit une diminution de l'abondance bactérienne. Une diminution de l'activité dénitrifiante est également observée à 35°C, celle-ci s'expliquant notamment par une diminution significative de l'abondance de gènes *nirK* dans la communauté sédimentaire pour des températures supérieures ou égales à 30°C.

Les changements les plus nets des conditions physico-chimiques et microbiennes sont induits entre 32°C et 35°C, ce qui pourrait traduire un effet de seuil à ces températures. Au niveau des paramètres microbiens, cette différence, plus marquée à 35°C, est principalement observée sur la diversité génétique bactérienne (périphyton et sédiments), l'activité photosynthétique (périphyton), le potentiel de dénitrification (périphyton et sédiments) et l'abondance et la proportion de gène *nirK* dans les communautés bactériennes (sédiments); ces différents paramètres fonctionnels étant significativement inhibés à ce niveau thermique.

A retenir

Les résultats obtenus montrent une incidence notable de la thermie, à la fois sur la physico-chimie mais aussi sur les communautés phototrophes (micro-algues et cyanobactéries) et bactériennes, tant au niveau de leur structure que de leur potentiel fonctionnel (diminution des capacités de photosynthèse, de respiration et de dénitrification, augmentation des capacités de méthanisation). Cependant, l'amplitude des réponses structurelles et fonctionnelles a été variable suivant l'origine et la période de prélèvement des communautés microbiennes, traduisant une forte variabilité locale et temporelle de ces réponses. La plupart des effets significatifs ont été observés à partir de 30°C, traduisant un possible effet de seuils thermiques à partir desquels des modifications structurales et fonctionnelles du compartiment microbien benthique peuvent être détectées.

Les modifications les plus marquantes apparaissent à partir de 32°C, traduisant un possible effet seuil dans la réponse des communautés microbiennes à une hausse importante des températures.

4. CONCLUSION DES ÉTUDES MENÉES DANS LE CADRE DE LA PHASE 4

Du point de vue de la thermie, la mise en perspective des mesures réalisées depuis les années 1970 avec les données reconstituées à l'échelle séculaire ont permis de caractériser l'évolution et la variabilité des températures de l'eau du bassin rhodanien.

Les résultats de l'ETRP4 confirment les résultats de l'ETRP2, tout en les précisant. Entre 1920 et 1987, les températures du Rhône ont été marquées par d'importantes variations inter-annuelles mais sans véritables tendances évolutives. Depuis 1987, une **tendance à la hausse des températures annuelles** de l'eau se rencontre (de + 0.4°C à Pougny à + 2.1°C à Tricastin), sur le Rhône et ses affluents (e.g. Saône), et principalement en été (> +3°C à Aramon en août). Pour les températures « les plus chaudes de l'année » (quantile 95%), l'augmentation des températures s'élève à 1.6°C à Saint-Alban, 2.1°C à Tricastin et 2.6°C à Aramon si l'on prend la période [1920-1976] comme référence ; alors qu'en les comparant à la période intermédiaire « sans rejets thermiques » [1977-1987] (cf.ETRP2), cette élévation est respectivement de 2.4°C, 2.6°C et 3.6°C.

L'examen des simulations, avec et sans rejets thermiques des CNPE, sur la période [1988-2010] (*i.e.* post-rupture climatique et avec des rejets thermiques des CNPE « stationnaires ») met en évidence, un échauffement résiduel du Rhône lié aux rejets des CNPE, en moyennes annuelles, de 0.5°C à Saint-Alban, 0.6°C à Tricastin et 1.2°C à Aramon. Pour les températures « chaudes », les rejets des CNPE participent à l'augmentation des températures, à hauteur de 0.7°C à Saint-Alban, 0.8°C à Tricastin et 1.6°C à Aramon. La part contributive (en proportion) des rejets thermiques des CNPE à l'élévation des températures du Rhône dépend donc étroitement du lieu, de l'indicateur (température moyenne, température « chaude », ...) et de la période de référence retenue pour caractériser l'évolution globale de la température du Rhône.

Le changement climatique ainsi que les aménagements hydraulique (et leur gestion associée) du bassin versant dans son ensemble, constituent les autres facteurs expliquant cette évolution des températures du Rhône. L'anthropisation du fleuve a contribué à limiter la variabilité des températures en conservant la température moyenne. A ce titre, le Rhône dans la configuration d'aménagement actuelle est donc moins propice aux températures estivales élevées que le Rhône ancien « non aménagé », pour des conditions atmosphériques et de rejets thermiques comparables.

En dehors des périodes de « gouttes froides », les amplitudes journalières de température du Rhône sont faibles comparativement aux autres fleuves français, et sont gouvernées par les écarts de température air-eau et par la gestion hydraulique du Léman et des aménagements du bassin versant. Depuis 1999, la gestion journalière et hebdomadaire des débits a été dynamisée, induisant une augmentation des marnages journaliers modifiant fortement l'habitat hydraulique des poissons en dehors des biefs de navigation. **Le transfert de débit s'effectue en une journée environ entre le Léman et le delta du Rhône alors que le temps de transfert thermique est compris entre 5 jours (en crue) et 15 jours (à l'étiage).** La recherche globale de solutions hydrauliques pour limiter la hausse ponctuelle des températures de l'eau montre qu'en « situation chaude », seule l'activation synchrone de plusieurs leviers à des niveaux importants (*i.e.* plusieurs dizaines de m³/s supplémentaires pendant quelques jours consécutifs) permettrait d'escompter un effet thermique de l'ordre du degré Celsius.

Du point de vue écosystémique, la phase 4 montre une **dérive biologique et écologique des peuplements de macroinvertébrés et de poissons, à l'amont et à l'aval des CNPE**, depuis la mise en place des suivis environnementaux long-terme associés notamment à la surveillance des CNPE (à partir des années 1980 pour la plupart).

L'atlas cartographique, présentant la distribution des 130 principales espèces de poissons, de macroinvertébrés et de macrophytes sur le Rhône et le cours aval de ses principaux affluents, permet aujourd'hui de disposer d'un **outil objectif pour étudier l'évolution à grande échelle** de la composition des écosystèmes aquatiques. Les analyses géo-historiques montrent que l'arrivée de cortèges de nouvelles espèces serait continue et donc indépendante des conditions thermiques du fleuve. Par contre, les températures élevées influenceraient les conditions de maintien en sélectionnant les espèces thermophiles.

Pour les macroinvertébrés, la part relative des facteurs écologiques (hydrologie, aménagement et gestion du fleuve ou autres pressions exercées sur le bassin versant) n'a pu être quantifiée. La définition d'un outil, permettant de diagnostiquer le degré de perturbation thermique d'un milieu à partir de métriques taxonomiques ou bio-écologiques de macroinvertébrés, est donc **scientifiquement inaccessible à ce jour** malgré les moyens importants mis en œuvre.

Pour les poissons, la température et l'hydrologie **interviennent dans la dynamique de la reproduction et sur le développement embryonnaire** et post-éclosion. Les analyses mettent en évidence le rôle de la température dans la phénologie de la reproduction des différentes espèces et la croissance des juvéniles. La probabilité de survie et de maintien des juvéniles lors de la période de croissance post-éclosion dépend de facteurs biotiques (disponibilité de la nourriture, bon déroulement de l'ontogénèse, prédation...) et abiotiques tels que les variations de débits, notamment dans les vieux-Rhône. Les résultats obtenus montrent que les hausses de débit ont un impact plus marqué sur les très jeunes stades mais ne sont pas le seul facteur intervenant dans la régulation des effectifs de juvéniles au cours de leur premiers mois de développement.

Les expérimentations novatrices menées au droit du CNPE de Bugey complètent les connaissances sur les préférences d'habitat de 3 espèces de poisson (chevaine, barbeau, silure). A une échelle locale, les habitats sélectionnés sont logiquement variables selon l'espèce mais plus surprenant variables aussi selon les individus d'une même espèce. Ils sont fonction de l'évolution des débits et de la phase nycthémerale, avec une utilisation privilégiée des eaux échauffées par le silure et un évitement des zones à la température dépassant 25°C par les cyprinidés (barbeau et chevaine). Les déplacements à grande échelle ne se produisent que pour des températures de l'eau dépassant 10°C pour les cyprinidés et 17°C pour le silure. L'ensemble des individus suivis **sélectionnent majoritairement des habitats en berge** (en lien avec les variations de débit) contrairement à leurs *preferenda* habituels pour le barbeau et le silure.

Le maintien des espèces dans un Rhône très anthropisé n'est possible que grâce à la capacité des espèces à exprimer des traits d'histoire de vie dans un contexte de perturbation des facteurs abiotiques importants comme l'hydrologie, la thermie et la qualité du substrat et des paramètres associés. Les études réalisées dans le cadre de l'ETRP4 avaient pour objectif de fournir des informations concernant les modalités de « réponse » des différentes espèces aux conditions thermiques en lien avec l'hydrologie dans différents compartiments du fleuve. Elles visent donc à

apporter des connaissances nécessaires pour la compréhension des mécanismes à l'origine du maintien des différentes populations dans le Rhône sans pour autant permettre une véritable étude de la dynamique de ces populations. Elles constituent donc une phase initiale des recherches destinées à mieux comprendre les processus de recrutement dans les populations en relation avec les conditions environnementales variées qui caractérisent aujourd'hui le Rhône et sont donc parfaitement complémentaires de celles déjà réalisées ou en cours.

Au niveau des RCC, les modalités de gestion du débit réservé structurent les habitats hydrauliques des populations aquatiques. Les habitats thermiques sont également conditionnés par la valeur de ce débit, mais également par **l'origine des eaux restituées**, pouvant provenir d'une **retenue thermiquement stratifiée** (e.g. Baix). Les RCC des 2 sites considérés (Péage de Roussillon et Baix-Le Logis-Neuf) constituent des lieux privilégiés de reproduction pour l'ensemble des espèces de cyprinidés. Cependant, l'état actuel des analyses ne permet pas de conclure sur le rôle des RCC dans la diffusion en juvéniles vers les autres entités fluviales du système rhodanien mais cette hypothèse est qualitativement confortée par les investigations menées dans l'ETRP4. L'étude met en évidence l'existence d'une **période de vulnérabilité importante (les stades de développement les plus précoces) pendant laquelle une variabilité temporelle moindre des débits est favorable** au maintien des jeunes stades dans le système. Par ailleurs, les populations fluviales, qui ont conservé au cours de l'évolution certains traits biologiques caractéristiques (e.g. pontes fractionnées, quantité d'œufs, longévité importante des individus), sont mieux « armées » pour faire face à une variabilité inter-annuelle du succès de reproduction. Enfin, les crues exceptionnelles de 1993-1994 ont contribué (surtout à l'aval de la confluence avec l'Isère) à améliorer la qualité du substrat (lessivage des sédiments fins et des polluants associés) avec pour effet, la mise à disposition de frayères de meilleure qualité, notamment pour les cyprinidés rhéophiles et lithophiles.

Le rôle fonctionnel du compartiment microbien, à la base de nombreux processus écologiques dans les cours d'eau, et sa sensibilité à la température étaient inconnus dans le Rhône. Des essais en laboratoire réalisés à partir de prélèvements *in situ* de communautés microbiennes (périphytiques et sédimentaires) rhodaniennes ont permis de mettre en évidence une **incidence notable de la température sur leur structure (micro-algues et bactéries) et sur leur potentiel fonctionnel** (diminution du potentiel photosynthétique et de dénitrification). La plupart des effets significatifs n'ont été observés qu'à partir de températures supérieures ou égales à 30°C (*i.e.* 30°C, 32°C et 35°C), traduisant un possible effet de seuils thermiques sur la microbiologie rhodanienne étudiée."

L'ETRP4 a été conçue comme une **phase exploratoire avec acquisition de données originales** pour observer et comprendre les relations entre deux facteurs écologiques majeurs (débit et température de l'eau) et les biocénoses. Les résultats confirment le rôle de ces facteurs sans pouvoir distinguer clairement la part respective de chaque facteur. Cela peut s'expliquer par le fait que la chimie des eaux était apparue comme le facteur principal au cours de l'ETRP3 et par les liens entre ces trois facteurs (chimie, thermie, hydrologie). La distinction de la part respective des facteurs température et débit, dans l'estimation des pressions exercées sur les écosystèmes, est limitée par la quantité et la représentativité des mesures biologiques par rapport aux mesures physiques, et ce malgré un effort de mesures biologiques sans précédent à l'échelle d'un grand fleuve. Pour la **température, l'ETRP4 met en évidence des effets linéaires ou à seuil en fonction des communautés étudiées**. En ce qui concerne le facteur **débit, les effets sur les biocénoses semblent plus liés aux caractéristiques des variations débitmétriques** qu'à la valeur absolue du débit.

L'ETRP4 a mis en évidence des variabilités insoupçonnées sur plusieurs thématiques : (1) sur la thermie générale du Rhône, (2) sur les comportements individuels des organismes d'une même espèce, ou (3) sur les caractéristiques de reproduction de certaines espèces qui apparaissent plus complexes que ce qui est admis dans la littérature. Cet accroissement de la complexité est inhérent aux études très fines rarement réalisées sur des écosystèmes d'une telle ampleur.

5. BIBLIOGRAPHIE PRODUITE DANS LE CADRE DE L'ÉTUDE RHÔNE PHASE 4

5.1. RAPPORTS ET LIVRABLES

Capra H., Pella H., Bergé J., McNeil E., Ovidio M., Bouillon M. C., Alfaro C., Jeanpierre A., 2012. *Lot 4 - Utilisation de l'habitat hydraulique et thermique par les poissons*. Étude thermique Rhône, phase 4. Rapport IRSTEA.

Carrel G., Jézéquel C., Fruget J-F., Olivier J-M., 2012. *Lot 1 - Évolution de la distribution spatio-temporelle de macrophytes, macro-invertébrés benthiques et poissons autochtones et allochtones de l'axe fluvial rhodanien*. Étude thermique Rhône, phase 4. Rapport IRSTEA/ARALEP/LEHNA.

Dessaix J., Fruget J-F., Centofanti M., 2012. *Lot 3b - Dynamique des populations de Crustacés du Rhône à Saint-Alban. Suivi 2009-2011*. Étude thermique Rhône, phase 4. Rapport ARALEP.

Langlais S., Duvert C., Poirel A., 2012. *Lot 5 - Relations entre hydrologie et thermie du Rhône*. Étude thermique Rhône, phase 4. Rapport EDF-DTG.

Fruget J-F., Centofanti M., Dessaix J., Brana J-Y., 2012. *Lot 3c - Rôle des zones annexes refuges sur le RCC de Péage-de-Roussillon. Suivi 2009-2011*. Étude thermique Rhône, phase 4. Rapport ARALEP.

Jezequel C., Fruget J-F., 2012. *Lot 3a - Influence de l'évolution thermique naturelle et anthropique sur la diversité fonctionnelle des macroinvertébrés au travers de l'étude des traits bio-écologiques*. Étude thermique Rhône, phase 4. Rapport ARALEP.

Meynard M., Testi B., Veslot J., Carrel G., 2012. *Lot 2-Facteurs hydroclimatiques et taille des poissons juvéniles*. Étude thermique Rhône, phase 4. Rapport IRSTEA.

Peru N, Olivier J-M., 2013. *Lot 3d - Analyse du rôle du débit et de la température sur le succès de reproduction des espèces de Cyprinidés sur deux sites du Bas-Rhône : Péage-de-Roussillon et Baix-Logis-Neuf*. Étude thermique Rhône, phase 4. Rapport Université Claude Bernard/LEHNA.

Veslot J., 2012. *Discrimination automatique des cohortes de juvéniles à partir des distributions de tailles*. Rapport IRSTEA.

Pesce S., Lambert A-S., Neyra M., Montuelle B., 2013. *Programme Microtherm - Influence de la thermie sur les communautés microbiennes aquatiques*. Rapport bibliographique. Rapport IRSTEA.

Pesce S., Lambert A-S., Foulquier A., Volat B., Neyra M., Montuelle B., 2013. *Thermie et processus microbiens dans le Rhône. Programme Microtherm 2011-2013*. Rapport final.

5.2. PUBLICATIONS DANS LES REVUES SCIENTIFIQUES À COMITÉ DE LECTURE

Capra H., McNeil E., Bouillon M-C., Pella H., Alfaro C., 2011. *Intérêt d'un modèle hydrodynamique en deux dimensions pour interpréter le comportement des poissons dans les grands cours d'eau*. Revue La Houille Blanche, n°6, p. 28-33.

Bergé J., Capra H., Pella H., Steig T., Ovidio M., Bultel E., Lamouroux N., 2012. *Probability of detection and positioning error of a hydro acoustic telemetry system in a fast-flowing river: Intrinsic and environmental determinants*. Fisheries Research 125– 126 (2012) 1– 13

5.3. COMMUNICATIONS DANS LE CADRE DE COLLOQUES

Archambaud G., Breugnot C., Carrel G., Veslot J., Le Coarer Y., Fruget JF., 2012. Protocoles d'échantillonnage des macroinvertébrés benthiques dans le Rhône aval régulé, et informations sur leur distribution dans les substrats. Actes du colloque ISRIVERS, Lyon.

Bergé J, Capra H., Pella H., Ovidio M., McNeil E., Oriol E., Lamouroux N., 2011. *Description of fish mobility in a large regulated fast flowing river (the Rhône River, France) using fine scale acoustic tracking*. AFS 2011 Symposium.

Capra H., McNeil E., Bouillon M-C., Pella H., Alfaro C., 2010. *Intérêt d'un modèle hydrodynamique en deux dimensions pour interpréter le comportement des poissons dans les grands cours d'eau*. Colloque SHF.

Capra H., Pella H., Ovidio M., McNeil E., Bergé J, Oriol E., 2011. *Use of fixed and mobile acoustic telemetry systems to understand fish responses to habitat variability in a large river (Rhône, France)*. AFS 2011 Symposium.

Capra H., Ovidio M., Pella H., Bergé J., McNeil E., Le Pichon C., Morin J., , 2012. *Modélisation hydrodynamique et télémétrie : vers de nouvelles connaissances pour l'écologie des poissons du Rhône*. Actes du colloque ISRIVERS, Lyon.

Capra H., Ovidio M., McNeil E., Pella H., Le Pichon C., Morin J., Bergé J., 2012. *Fish responses to artificial flow and water temperature variability in a large river (Rhône, France)*. 9th International Symposium of EcoHydraulics, Vienna.

Fruget JF., Archambaud G., Jézéquel C., Dessaix J., Roger MC, Breugnot C., 2012. *Influence de la variabilité hydroclimatique sur la biodiversité fonctionnelle des peuplements de macroinvertébrés du Rhône*. Actes du colloque ISRIVERS, Lyon.

Fruget JF., Dutartre A., Chauvin Ch., Boucard E., Archambaud G., 2012. *Suivi à long terme des herbiers de macrophytes en grands cours d'eau et évolution structurelle des peuplements. Exemple du Rhône aménagé*. Actes du colloque ISRIVERS, Lyon.

Martineau Th., Carrel G., Veslot J., Vidal L., 2012. *Les longues chroniques piscicoles du Rhône : Intérêts et limites face à la pluralité des objectifs de gestion écologique d'un grand fleuve aménagé*. Actes du colloque ISRIVERS, Lyon.

Pella H., Capra H., Bergé J., Lamouroux N., Oriol E. *Designing installations of fixed and mobile telemetry systems in a large river to optimize the precision and accuracy of fish position estimates*. Poster au AFS 2011 Symposium.

Poirel A., 2012. *La thermie du fleuve Rhône*. Journée « Connaissances Fleuve Rhône » organisée par l'Agence de l'eau RMC.

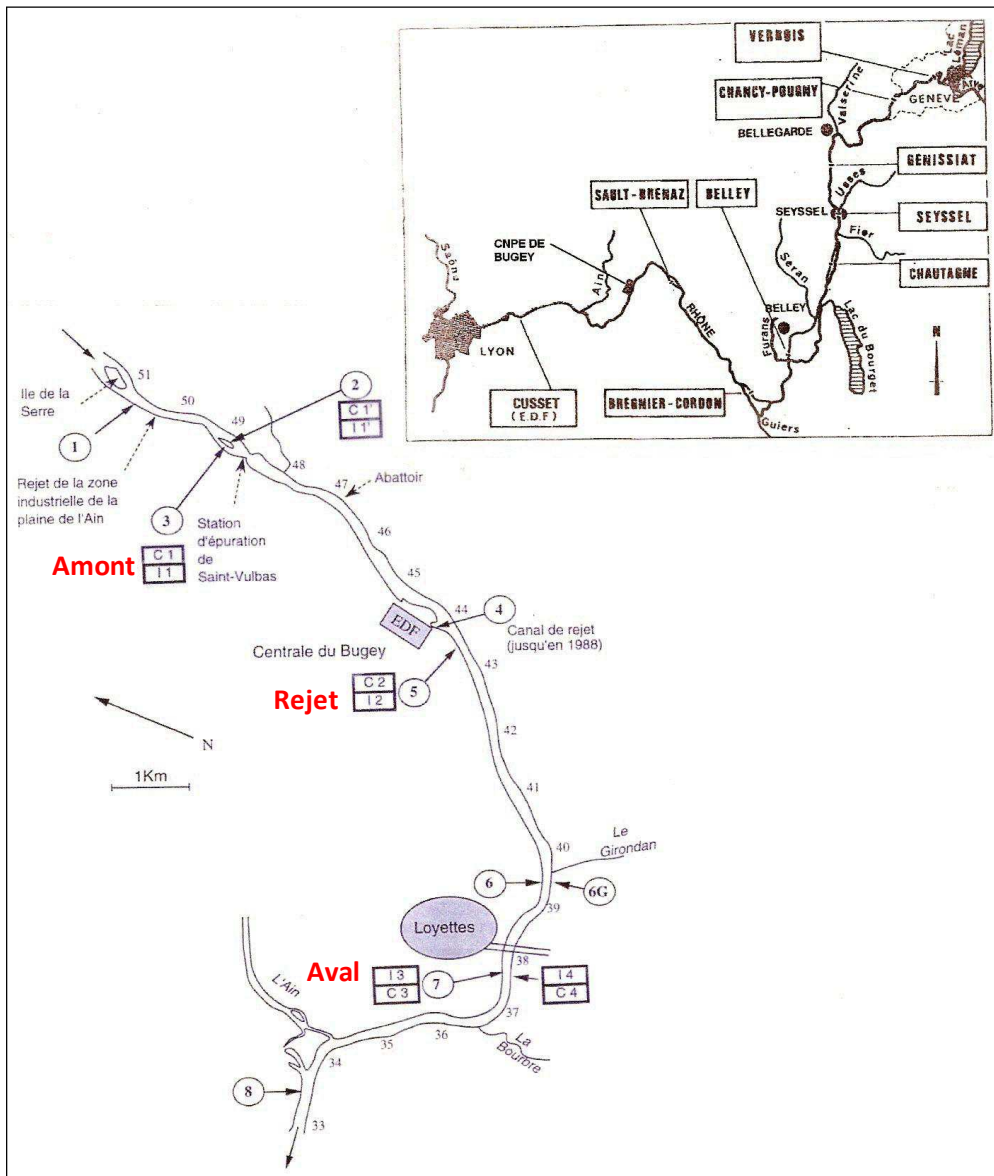
Poirel A., Carrel G., Olivier JM., Fruget JF., Langlais S., 2012. *Apport des connaissances sur la thermie du Rhône dans l'actualisation des règles de gestion du fleuve*. Actes du colloque ISRIVERS, Lyon.

5.4. THÈSE UNIVERSITAIRE

Julien Bergé, 2012. *Apport de la télémétrie acoustique pour la compréhension de l'utilisation dynamique des habitats par les poissons dans un grand fleuve aménagé, le Rhône*. Université Claude Bernard, Lyon.

6. ANNEXE - LOCALISATION DES STATIONS DE SUIVIS UTILISÉES DANS LE CADRE DE L'ETRP4 (PROGRAMME DE SURVEILLANCE HYDRO-ÉCOLOGIQUE DES CNPE DU RHÔNE ET STATIONS SPÉCIFIQUES)

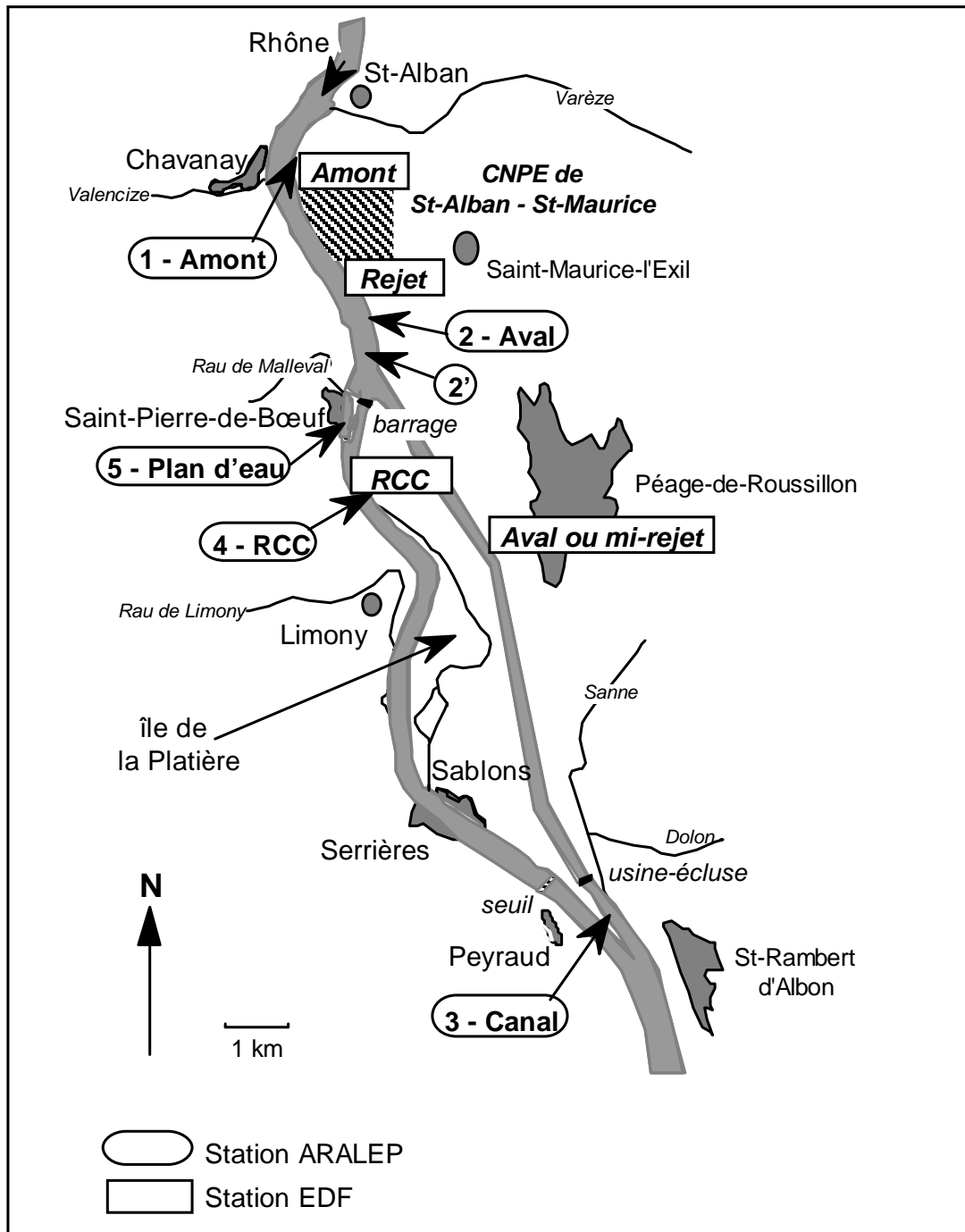
6.1. CNPE DE BUGEY. LOCALISATION DES STATIONS DE MESURE DU PROGRAMME DE SURVEILLANCE HYDRO-ÉCOLOGIQUE



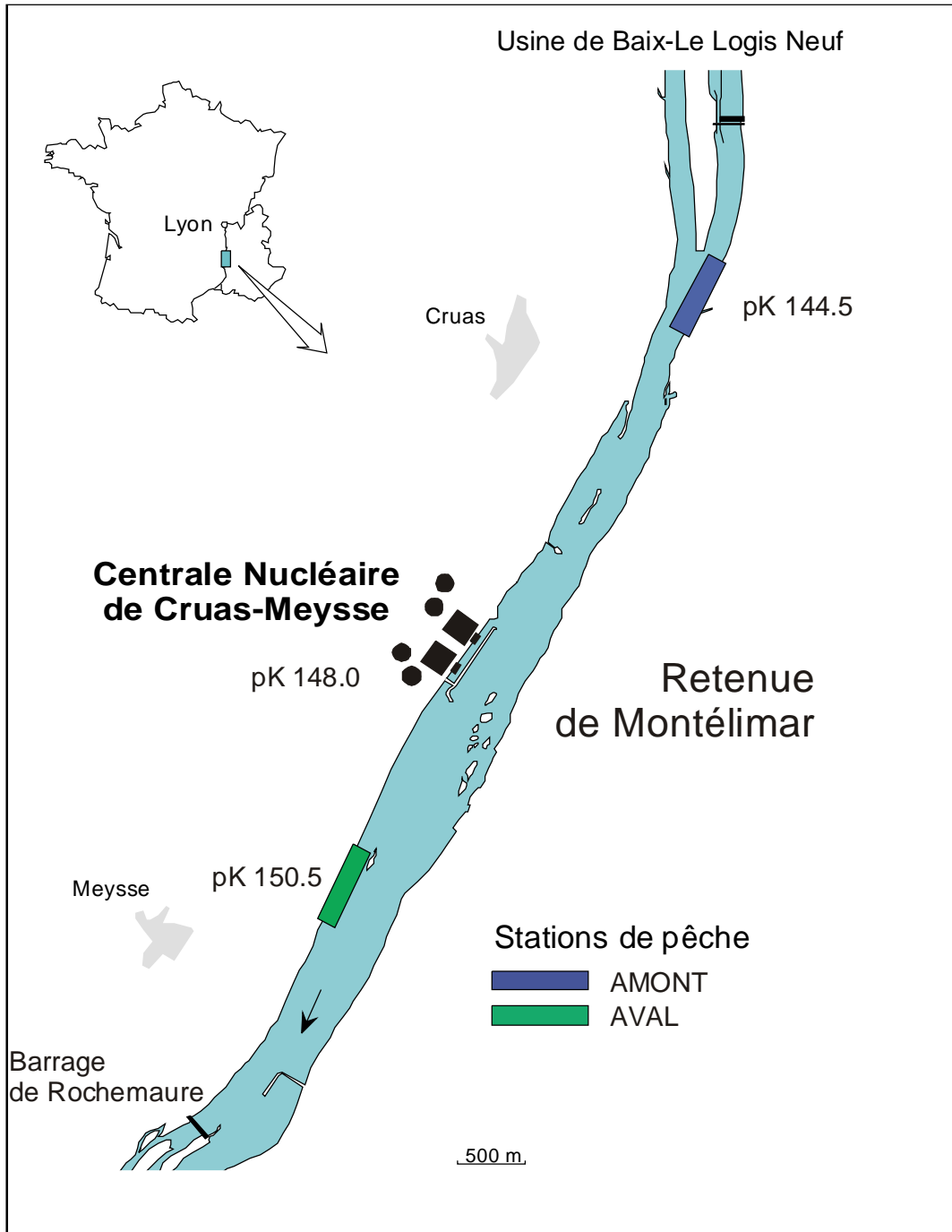
○ Pêches électriques

□ I Invertébrés

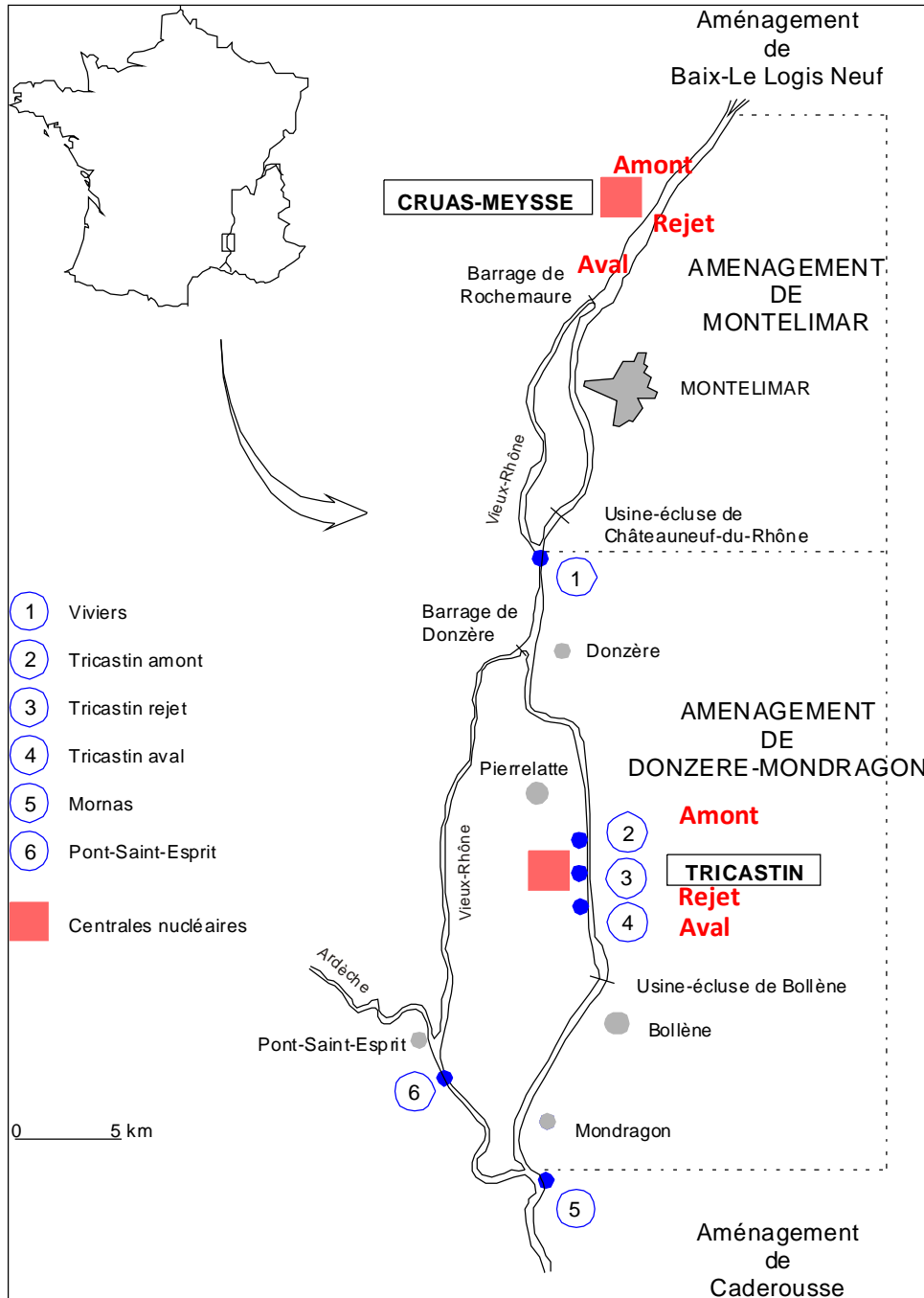
6.2. CNPE DE SAINT-ALBAN. LOCALISATION DES STATIONS DE MESURE DU PROGRAMME DE SURVEILLANCE HYDRO-ÉCOLOGIQUE



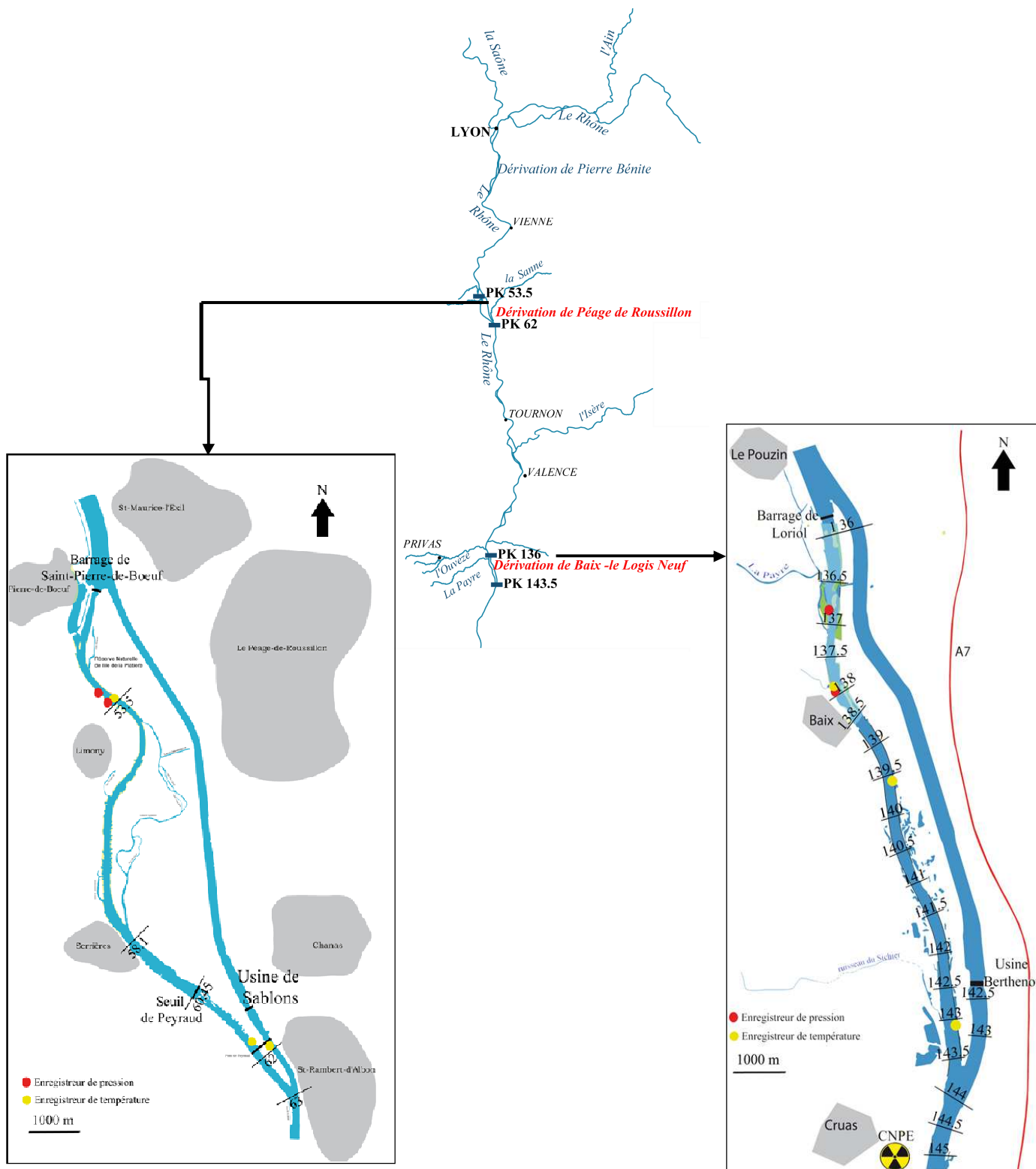
6.3. CNPE DE CRUAS. LOCALISATION DES STATIONS DE PÊCHE DU PROGRAMME DE SURVEILLANCE HYDRO-ÉCOLOGIQUE



6.4. CNPE DE TRICASTIN. LOCALISATION DES STATIONS DE PÊCHE DU PROGRAMME DE SURVEILLANCE HYDRO-ÉCOLOGIQUE



6.5. SITES SUIVIS SPÉCIFIQUEMENT LORS DE L'ETRP4 À PÉAGE-DE-ROUSSILLON ET À BAIX-LE LOGIS NEUF



Les points kilométriques (PK) sont figurés par des traits continus noirs. Haut : carte générale du Rhône et de ses principaux affluents entre Lyon et la dérivation de Baix-Logis-neuf. Bas : détails des deux sites d'étude et localisation des enregistreurs : température (points jaunes) et pression d'eau (points rouges)