

SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE THERMIQUE DU RHÔNE

MAI 2016



L'étude thermique du Rhône a bénéficié de financements de l'Agence de l'eau RMC, de l'Union Européenne (fonds FEDER), et d'EDF. L'Europe s'engage sur le fleuve Rhône avec le Fonds Européen de Développement Régional.

Synthèse de l'étude thermique du Rhône

L'étude thermique du Rhône a été initiée par le Préfet coordonnateur du bassin Rhône-Méditerranée pour caractériser l'impact des rejets thermiques des centrales nucléaires sur le fleuve. Sa réalisation a été confiée à EDF, sous pilotage d'un comité réunissant l'État, l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-

Corse, l'ONEMA, l'Agence Régionale de Santé Rhône-Alpes, l'Agence de Sûreté Nucléaire, CNR et EDF.

De nombreuses équipes scientifiques ont été associées aux travaux.

L'étude Thermique du Rhône 2000-2014 a été construite en 4 phases.

■ PHASE 1

Quelles sont les caractéristiques thermiques du Rhône et de ses affluents ?

■ PHASE 2

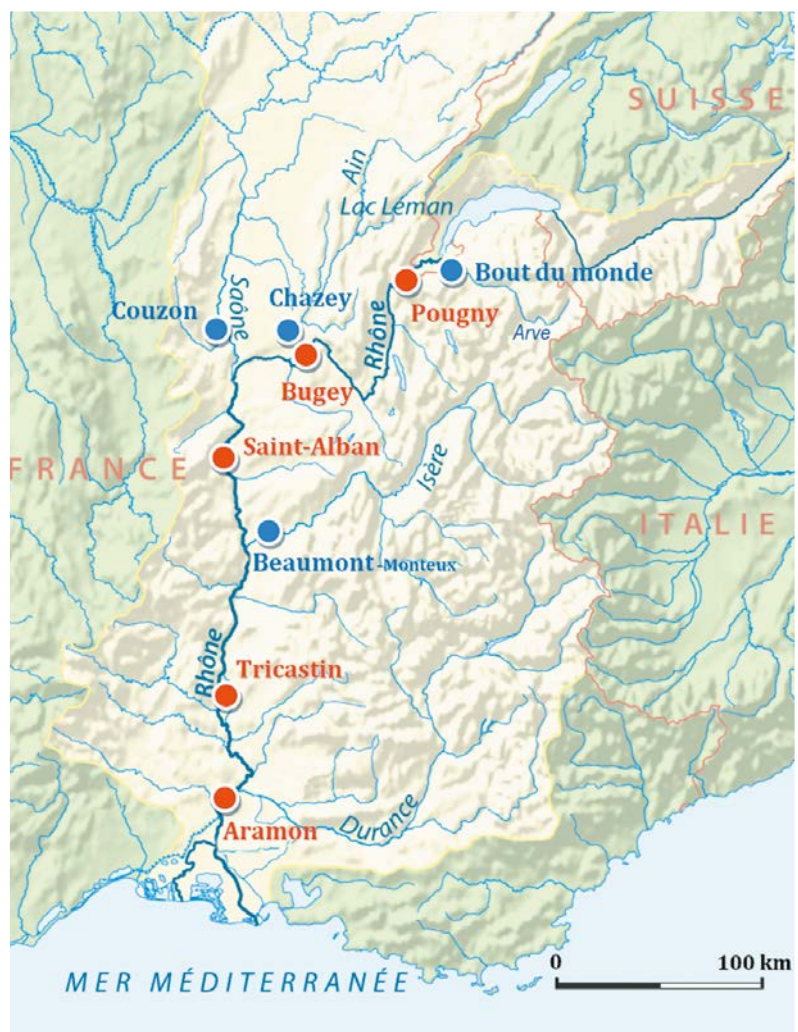
Quels sont les facteurs qui influencent la température du fleuve et de ses affluents, et quelle est la contribution des rejets thermiques des Centres Nucléaires de Production d'Électricité (CNPE) ?

■ PHASE 3

Quels sont les effets de l'hydrologie, la chimie et la thermie sur les écosystèmes aquatiques ? Quelle est la contribution des échauffements des CNPE sur ces effets ?

■ PHASE 4

Peut-on préciser certains des mécanismes en action dans les évolutions de l'écosystème rhodanien en lien avec les régimes thermiques et hydrologiques ?



Localisation des stations de température de l'eau (en bleu, station affluent) dans le bassin versant du Rhône (en beige).

Nota : les stations ayant le nom d'un Centre Nucléaire de Production d'Électricité représentent l'amont des CNPE.



Confluent du Rhône et de l'Arve en aval de Genève.



La température du Rhône et son évolution depuis 1920

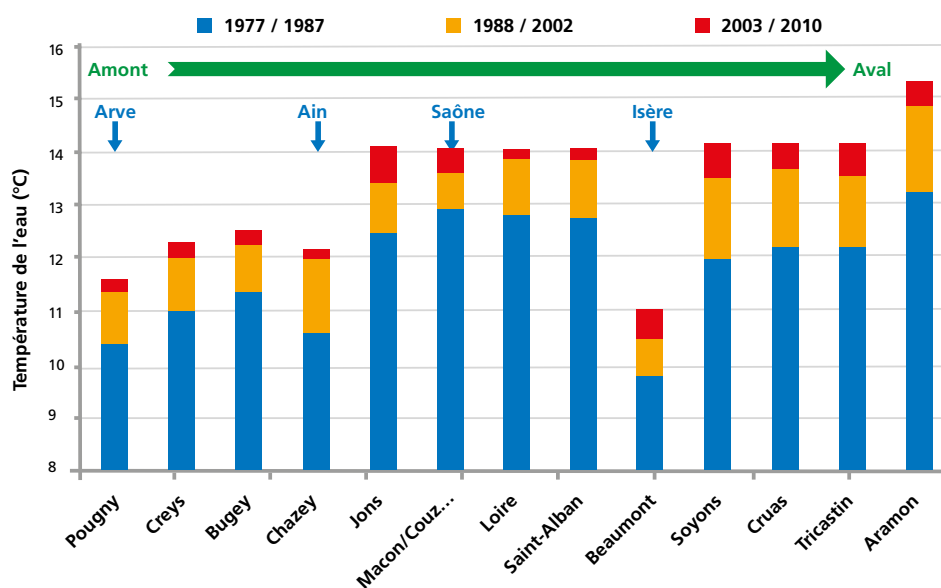
La température du bassin du Rhône d'amont en aval

Les températures de l'eau sont mesurées depuis 1977 sur différentes stations du Rhône et de ses affluents principaux. Ces chroniques 1977-2010 ont été étendues par modélisation statistique à la période 1920-1976.

La température du Rhône augmente de l'amont vers l'aval, avec une incidence variable des 4 affluents principaux.

La Saône est un affluent plutôt chaud, l'Ain un affluent froid en hiver ; l'Arve et l'Isère sont des affluents très froids.

L'Isère abaisse les températures du Rhône de 1°C en période chaude.



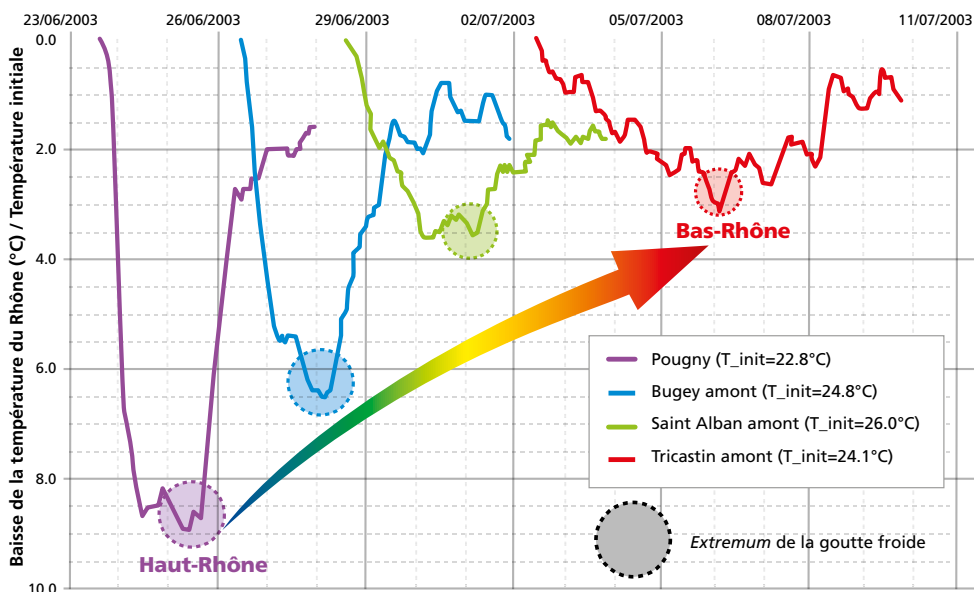
Évolution amont-aval des températures de l'eau.

Le transfert amont-aval

Les transferts amont-aval sur le Rhône sont relativement conservatifs (par rapport aux autres fleuves) car le fleuve est profond : **une modification de la température en un point du fleuve se propage loin vers l'aval, plus lentement que la propagation des volumes d'eau.**

Une modification de température en sortie du Léman est ressentie 5 à 15 jours plus tard à Tricastin, selon que l'on soit en situation de crue ou d'étiage, alors que le débit se transfère en moins de 3 jours en crue.

La connaissance de la température en sortie du lac Léman est donc un facteur fortement explicatif des variations de températures du Rhône à l'aval, d'autant qu'elle peut être soumise à de brusques variations. Sous l'effet du vent d'Ouest (notamment en été), le Léman subit des variations de niveau à l'origine d'apports de "gouttes froides" issues du fond du lac. À Pougny (20 km à l'aval du Léman), la chute brusque de température du Rhône peut atteindre -8°C en une demi-journée, et se propage vers l'aval en s'amortissant.



Suivi longitudinal de la "goutte froide" du 24/06/2003.

Quelles évolutions depuis 1920 ?

Sur la période 1920-2010, le Rhône s'est échauffé, avec une augmentation plus marquée sur sa partie aval : +0.4°C à Pougny, +0.6°C à Bugey, +0.9°C à Saint-Alban, +1.6°C à Aramon et +2.1°C à Tricastin, en moyenne annuelle.

Sur les affluents : si la hausse de température est de +1.6°C sur la Saône (essentiellement avant 1990), elle reste insignifiante sur l'Arve.

Cette évolution n'a pas été constante depuis 1920.

Le milieu des années 1980 marque une rupture entre une période variable et une période nettement plus chaude.

2003 a été l'année la plus chaude depuis 1920.

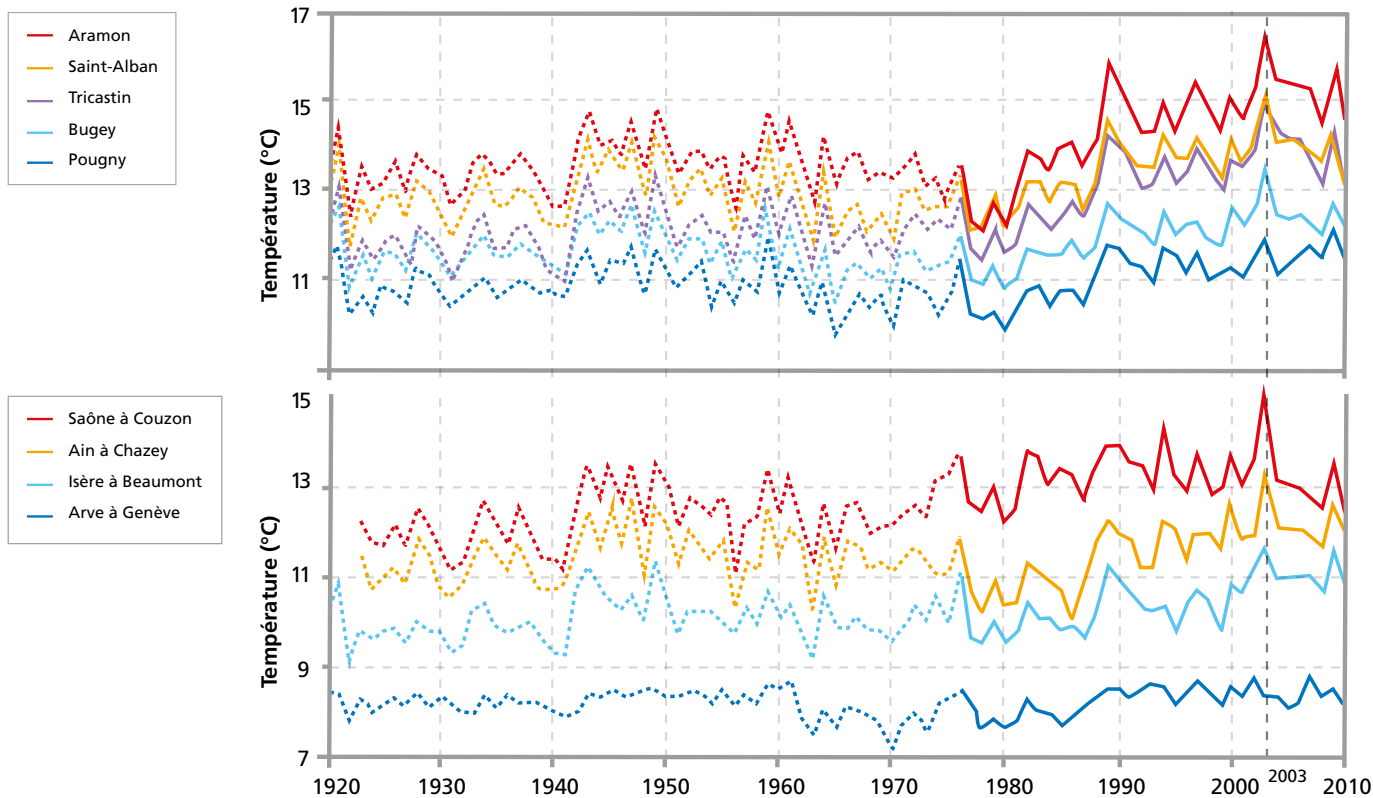
Les températures hivernales ont peu évolué alors que les mois d'été ont été nettement

plus marqués par cette hausse des températures, qui a pu atteindre jusqu'à +3.5°C pour août, à Aramon.

Chroniques de températures de l'eau du Rhône et de quelques affluents :

1920 / 1976 : données reconstituées par modélisation,

1977 / 2010 : données mesurées.



Centrale Nucléaire de Saint-Alban, vue depuis Chavanay.

Quels sont les facteurs qui gouvernent la température de l'eau ?

Les principaux facteurs qui déterminent la température du fleuve sont le réchauffement climatique, les rejets des centrales nucléaires de production d'électricité, les débits du fleuve et de ses affluents.

Le réchauffement climatique

Le réchauffement climatique, en modifiant les échanges entre le fleuve et l'atmosphère, est l'un des principaux facteurs de l'augmentation des températures du Rhône. Cependant, le changement climatique n'explique pas à lui seul les températures observées aujourd'hui.

Les rejets thermiques des Centres Nucléaires de Production d'Électricité

La mise en service des centrales nucléaires de production d'électricité sur le Rhône s'est échelonnée de 1978 à 1987. Depuis 1988, la quantité de chaleur apportée par les rejets thermiques de ces centrales est stable.

L'évaluation des échauffements dus aux centrales a été réalisée sur la période 1988-2010.

La température à l'aval d'une centrale, varie selon trois facteurs principaux :

- la température amont du fleuve,
- l'énergie thermique apportée par la centrale qui varie selon l'énergie électrique produite mais est indépendante, au premier ordre, de la température amont du fleuve,

- le ratio entre le débit constant du rejet de la centrale et le débit du fleuve.

Les échauffements moyens journaliers liés aux rejets thermiques des centrales peuvent varier de manière importante en fonction du débit du fleuve ; par exemple à Bugey, la moitié du temps ils sont inférieurs à 1,5°C, et 3 jours par an ils peuvent atteindre 6°C. Les échauffements dus à une centrale diminuent d'amont en aval principalement par échange entre le fleuve et l'atmosphère.

L'échauffement global à l'aval du fleuve est plus faible que la somme des échauffements de chaque centrale.

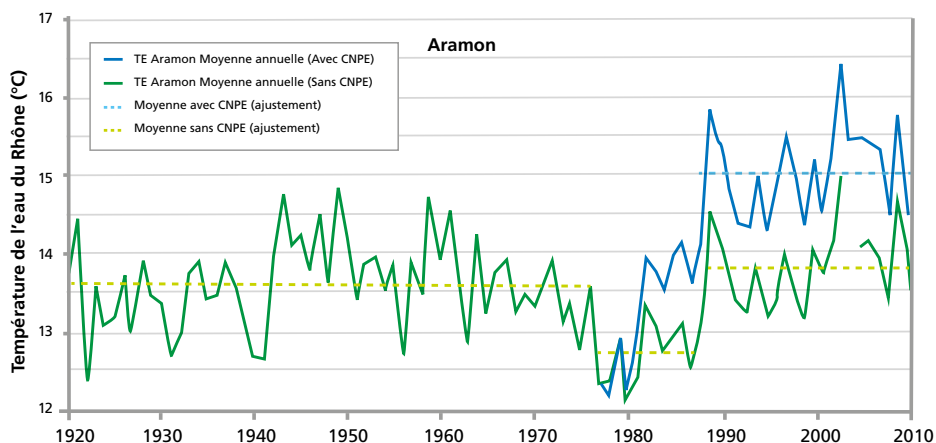
Compte-tenu de la forte variabilité climatique, il n'est pas possible de déterminer ce qu'auraient été les températures du Rhône sans incidence du changement climatique, sur la période 1988-2010.

Une période antérieure doit donc être choisie arbitrairement pour définir, par comparaison, la part contributive des rejets thermiques des centrales à l'élévation des températures du Rhône. Comme illustré (fig. ci-contre), ce choix influence fortement la contribution finale obtenue pour chaque centrale. Quelles que soient les périodes de

référence d'évolution des températures du Rhône pour comparer les échauffements des centrales, sur le Rhône Moyen et le Rhône Aval,

le réchauffement climatique et les rejets thermiques des centrales sont deux contributeurs principaux au réchauffement des eaux du Rhône.

La part d'échauffement liée aux rejets thermiques des centrales n'est pas constante au cours de l'année ; elle est moins importante pendant les "périodes chaudes".



Évolution des températures moyennes annuelles du Rhône à Aramon (avec et sans les rejets thermiques).



Centrale Nucléaire de Cruas-Meysses.

Augmentation de la température du fleuve et contribution des CNPE entre les périodes 1977-1987 et 1988-2010, ou entre les périodes 1920-1977 et 1988-2010

		à l'amont de St-Alban	à l'amont de Tricastin	à Aramon
En moyenne annuelle	Augmentation constatée entre les périodes 1920-1977 et 1988-2010 ou 1977-1987 et 1988-2010	1,0°C 1,5°C	1,7°C 1,7°C	1,4°C 2,3°C
	Contribution des CNPE	0,5°C	0,7°C	1,2°C
En période chaude*	Augmentation constatée entre les périodes 1920-1977 et 1988-2010 ou 1977-1987 et 1988-2010	1,6°C 2,4°C	2,1°C 2,6°C	2,6°C 3,6°C
	Contribution des CNPE	0,7°C	0,8°C	1,6°C

*Moyenne des 18 jours les plus chauds de l'année.

L'aménagement du fleuve, de son bassin versant, et les modifications de débit

Depuis 1920, les débits moyens annuels du bassin versant du Rhône n'ont pas évolué de façon significative.

Par contre, à l'échelle saisonnière, des évolutions marquées – en lien avec la création des grandes retenues alpines – sont observées à partir des années 1960 :

- ↘ diminution des débits en été (-30%),
- ↗ augmentation des débits hivernaux (+30%).

Ces modifications du régime hydrologique du Rhône sont visibles jusqu'à Beaucaire mais sont de moins en moins marqués en s'éloignant du Léman. Par ailleurs, à l'échelle

hebdomadaire, les chroniques montrent une gestion hydraulique plus dynamique du Léman depuis les années 1990, avec des débits plus faibles le week-end – et donc une augmentation de la température du Rhône (pour des rejets équivalents) – par rapport au reste de la semaine.

Les retenues hydroélectriques du Rhône (à l'aval du Léman) diminuent la variabilité des températures d'une année donnée en augmentant les températures des mois d'hiver (+0.4°C) et en abaissant celle des mois d'été (de façon variable suivant les stations ; effet le plus marqué à Saint-Alban : - 0.6°C).

Les aménagements hydrauliques sur le fleuve ont un effet de lissage proche de 0.5°C sur les températures extrêmes.

Les données plus anciennes (années 1870) précisent que les processus d'échange entre l'air et l'eau ont été modifiés par des effets

anthropiques multiples, et parfois antagonistes. À Lyon, la variabilité intra-annuelle des températures du Rhône a été nettement réduite. 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. On estime par exemple que, lors de la canicule de 2003, la température du Rhône, sans aménagement ni gestion hydraulique (situation en 1870), aurait été plus élevée d'environ 1°C.



Quels leviers activer pour influencer sur la température du Rhône ?



Barrage de Jons sur le canal de Miribel.

Les résultats obtenus montrent que l'anthropisation du fleuve (rejets des CNPE, modifications hydrologiques...) contribue à l'élévation de température du Rhône et posent la question de l'influence d'une gestion différente des usages de l'eau sur la température du Rhône, par exemple :

↘ **Limitation des échauffements induits par les rejets thermiques des centrales par adaptation de leur puissance électrique.**

En situation normale, la production d'électricité est adaptée aux limites thermiques autorisées. En situation exceptionnelle avec une température élevée du fleuve, la production d'électricité des centrales est plafonnée aux besoins requis pour la stabilité et la sûreté du réseau électrique afin d'éviter tout délestage, voire un *black out*.

↗ **Augmentation des débits par une gestion hydraulique adaptée.**

Le débit influence la température de l'eau en modifiant le temps de transfert des masses d'eau et diluant différemment les rejets thermiques. À cet effet, le débit des affluents

et leur gestion hydraulique ont fait l'objet d'une étude prospective sur leur éventuelle utilisation pour abaisser la température du Rhône.

Les simulations montrent un effet maximum sur le Rhône, à l'aval immédiat de la confluence avec chaque affluent : une gestion spécifique des ouvrages de stockage de ces affluents permettrait de limiter ponctuellement, pendant un nombre de jours restreint, les températures du Rhône, avec des baisses comprises entre 0.005°C (Isère) et 0,025°C (Arve) par m³/s supplémentaire. Vers l'aval, le gain se dissipe et s'amortit.

Par exemple, moins de 20% de la baisse de température provoquée par une hausse des débits de l'Arve se conserverait une fois l'eau arrivée sur le Bas-Rhône. En période de canicule, 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, avec des impacts sur les autres usages de l'eau.

Quelles sont les répercussions des évolutions thermiques et hydrologiques sur les communautés biologiques du Rhône ?

Les évolutions des régimes thermiques et hydrologiques ou de la qualité des eaux modifient le fonctionnement des communautés aquatiques et de l'écosystème.

Les études biologiques de l'étude thermique du Rhône ont visé à isoler l'effet direct des évolutions de la température sur l'écosystème sous l'angle de plusieurs compartiments biologiques (invertébrés, poissons, plantes et le compartiment microbien) à différentes échelles d'espace et de temps.

Des évolutions des peuplements à l'échelle du Rhône au cours des 30 dernières années

La faune et la flore du Rhône évoluent d'amont en aval avec une différenciation nette entre le Rhône, du Léman à Lyon, et le Rhône de Lyon à l'embouchure tout au long de la période étudiée (1980-2010).

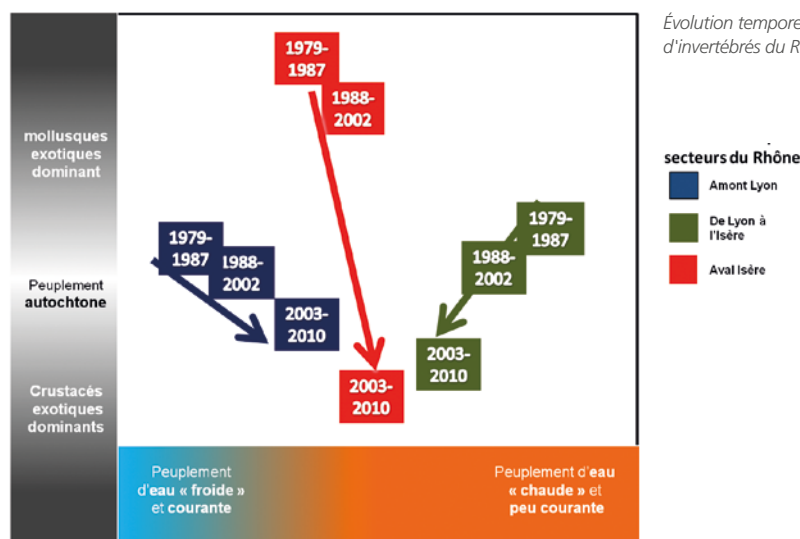
Bien que toujours distincts spatialement, une homogénéisation des peuplements est observée, plus particulièrement marquée depuis 2000. Cette dérive globale se caractérise par une augmentation graduelle des espèces d'eaux chaudes et lentes au cours du temps, au détriment d'espèces d'eaux froides et courantes, plus caractéristiques du Rhône.

Pour les invertébrés, les 24 espèces nouvelles (dont 11 depuis 1993, majoritairement d'origine ponto-caspienne et arrivées par l'axe Rhin-Rhône) contribuent fortement à cette dérive. À l'aval de l'Isère, la dominance des espèces exotiques est nette depuis 2000. Parmi ces nouvelles espèces, certaines deviennent envahissantes (*la corbicule* ou *la gammare Dikerogammarus*).

L'arrivée des espèces exotiques de mollusques et crustacés dans un peuplement composé initialement en majorité d'insectes, a modifié sa structure et ses caractéristiques biologiques.

Sous influence de températures plus élevées, les peuplements piscicoles du Rhône voient une augmentation des espèces d'eaux chaudes et peu courantes dont certaines sont allochtones (e. g. le silure ou le poisson-chat).

L'allongement entre 1980 et 2010 de la période annuelle de températures favorables à la biologie, aboutit, en fin d'été, à des juvéniles de l'année plus nombreux et plus grands. Les conséquences de ces modifica-



tions sur la pérennité des peuplements ne peuvent pas être évaluées avec les données disponibles.

Le constat est similaire pour la végétation aquatique qui évolue rapidement depuis les années 2000 avec une dominance nette des espèces allochtones.

Malgré des évolutions écologiques se faisant en concomitance d'évolutions physiques identifiées (régimes thermiques et hydrologiques, qualité des eaux), le lien entre ces composantes n'est pas aisé à établir.

Le facteur de contrôle de ces évolutions change dans le temps, suivant le secteur du Rhône et selon le compartiment biologique considéré.

Pour les invertébrés, la physico-chimie des eaux a été le déterminant principal - dans les décennies 1980 et 1990 - suite à l'améliora-

tion de la qualité des eaux puis, l'hydrologie à la faveur de crues importantes en 1994/95 et 2001/02 et enfin, la thermie pendant la période 2003-2010.

Pour les poissons, la température et l'hydrologie interviennent dans la dynamique de la reproduction et sur le développement embryonnaire et post-éclosion.

Influence locale des rejets thermiques des CNPE

Les rejets thermiques des CNPE en "circuit ouvert" induisent une hétérogénéité thermique locale très nette entre la rive du rejet et la rive opposée, de l'ordre de 5°C à Bugey.

Suivant le compartiment étudié (macrophytes, invertébrés ou poissons), des différences de peuplement existent qui se limitent aux zones soumises à l'échauffement (zone qui peut atteindre une dizaine

de kilomètres à Bugey) et ne se retrouvent pas en aval après mélange.

L'étude des peuplements d'invertébrés du Rhône au niveau du CNPE de Saint-Alban a montré des différences structurelles (richesse, abondance) et d'évolution temporelle du peuplement soumis à l'échauffement du rejet.

L'étude ciblée sur les crustacés et notamment deux espèces de gammares, a mis en évidence à l'aval immédiat du rejet une diminution de leurs effectifs (*Gammarus tigrinus*, *Dikerogammarus villosus*) ou une modification de leur cycle de reproduction (*D. villosus*).

Le suivi par télémétrie de poissons marqués (environ 100 individus adultes), mené au droit du CNPE de Bugey, a permis de préciser les préférences d'habitat de 3 espèces de poisson (chevaine, barbeau, silure). Les habitats sélectionnés varient selon l'espèce et, de manière moins attendue, selon l'individu. Ils sont fonction de l'évolution des débits et du moment de la journée.

À la différence du silure,

les cyprinidés (barbeau et chevaine) semblent éviter les zones où la température dépasse 25°C.

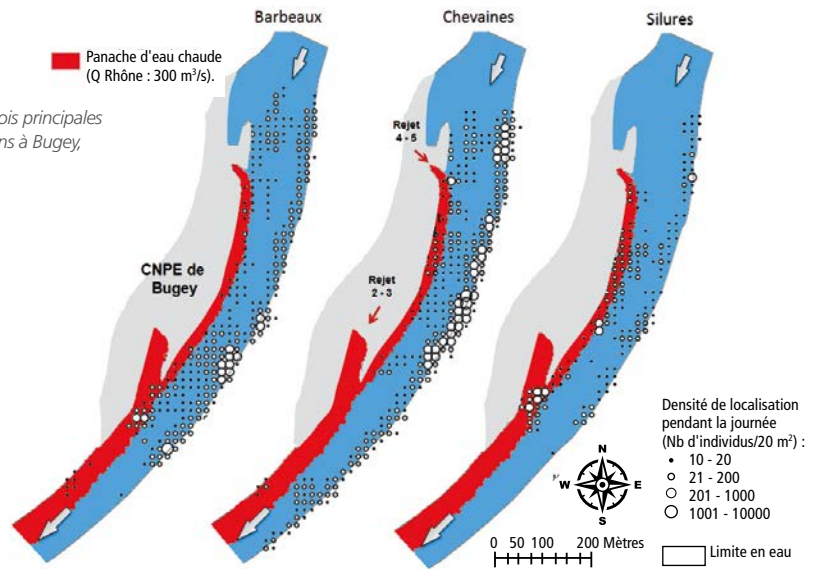
L'ensemble des individus suivis sélectionnent majoritairement des habitats en berge contrairement aux descriptions de la littérature pour le barbeau et le silure.

Fonctionnement biologique des tronçons court-circuités

Les sections fluviales du Rhône court-circuitées (RCC) se caractérisent d'une part par des habitats naturels plus diversifiés que les sections canalisées et des variations de température de l'eau plus importantes dues à une lame d'eau plus réduite. D'autre part, les modalités de gestion du débit structurent l'hydrologie et le régime thermique des RCC.

Ainsi, dans le cas étudié du RCC de Baix-Le Logis-Neuf soumis à un débit réservé provenant d'une retenue thermiquement stratifiée), le RCC est plus froid en été et plus chaud en hiver par rapport au Rhône canalisé.

Localisation des trois principales espèces de poissons à Bugey, en journée.



Les RCC étudiés dans l'étude thermique du Rhône, Péage de Roussillon et Baix-Le Logis-Neuf, constituent des lieux privilégiés de reproduction pour les poissons de zones peu profondes et courantes et certaines espèces exogènes (pseudorasbora, perche soleil).

Cependant, l'état actuel des analyses ne permet pas de conclure sur un rôle source des RCC dans la propagation des juvéniles de ces espèces vers le reste du fleuve.

Dans les RCC étudiés, les hausses rapides de débit entraînent une réduction des effectifs des très jeunes stades.



Schéma de principe d'un tronçon court-circuité (CNR, modifié).

L'analyse d'environ 120 000 juvéniles de poisson a confirmé le rôle des températures plus élevées sur la précocité de la reproduction et la croissance des juvéniles dans les RCC.

La température reste néanmoins un facteur secondaire par rapport aux facteurs biotiques (disponibilité de la nourriture, prédation...) qui sont les facteurs prépondérants de contrôle des populations.

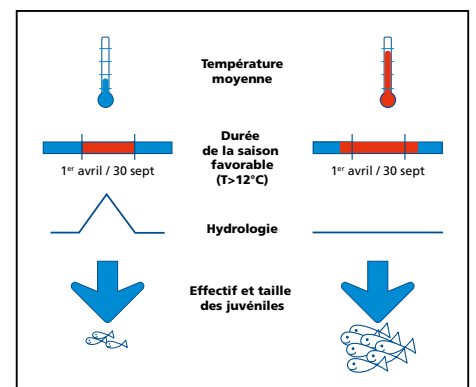
Compartiment microbien du Rhône

Des essais en laboratoire réalisés à partir de prélèvements *in situ* de communautés microbiennes (périphytiques et sédimentaires) rhodaniennes mettent en évidence

une incidence notable de la température sur leur structure et sur leur potentiel fonctionnel, dès l'atteinte de 32°C et de 35°C.

Cette gamme de température n'est mesurée qu'en sortie immédiate du rejet. L'étude a montré l'augmentation du potentiel de méthanisation et la diminution des potentiels photosynthétique et de dénitrification des communautés microbiennes.

Cette différence est principalement observée sur la diversité génétique bactérienne (périphyton et sédiments), l'activité photosynthétique (périphyton) et le potentiel de dénitrification (périphyton et sédiments). Ce résultat traduit un possible effet de seuil thermique sur la microbiologie rhodanienne étudiée.



Facteurs influençant le succès de reproduction des espèces de poissons.

Enseignements de l'étude thermique du Rhône

L'étude thermique du Rhône représente **une acquisition de connaissance sur 15 années, sans précédent à l'échelle d'un fleuve en Europe.**

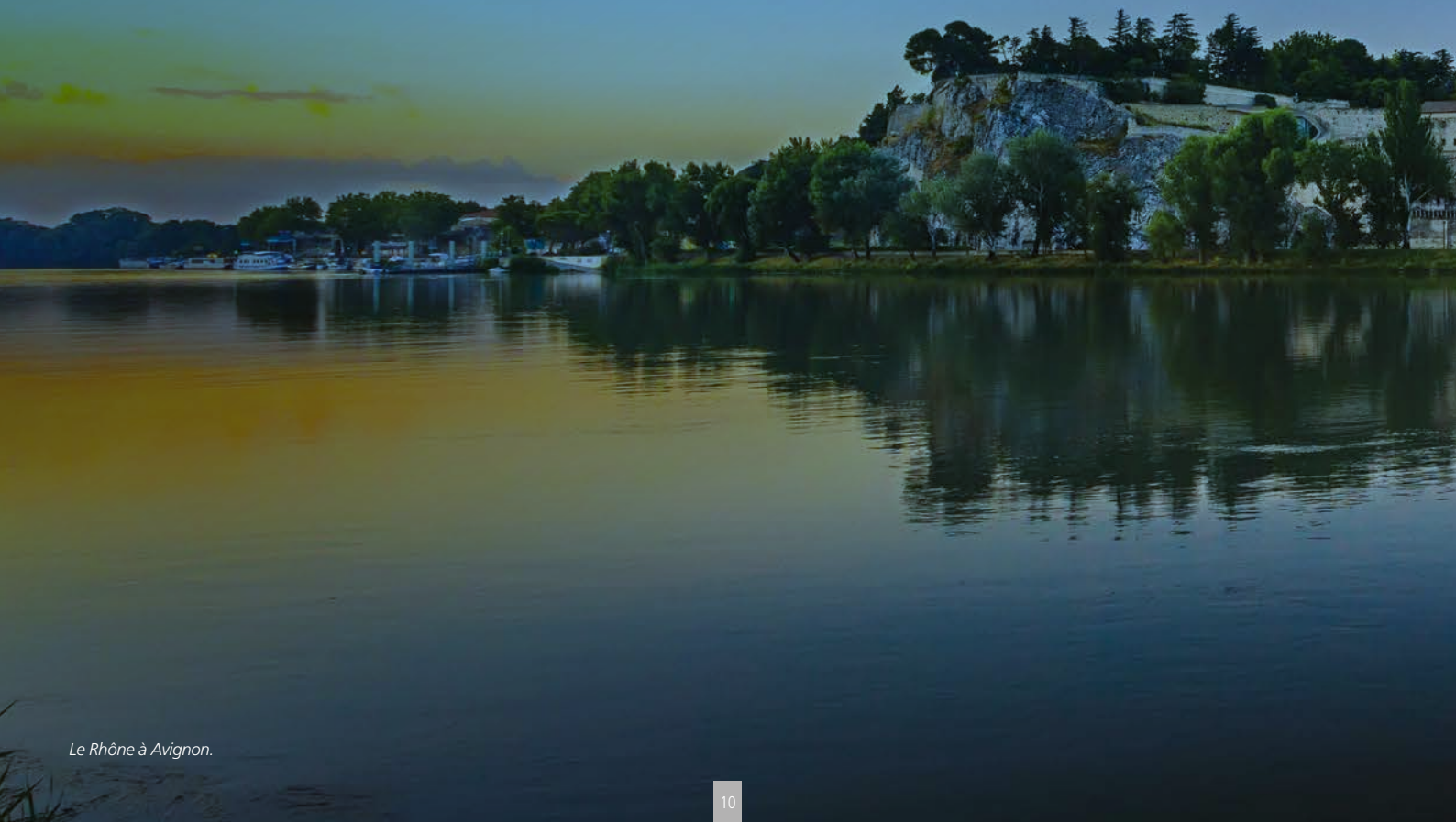
Les avancées, ou les remises en cause, établies sur l'écologie des communautés aquatiques dans un fleuve aménagé comme le Rhône, constituent une base scientifique essentielle à la gestion et la préservation de ces écosystèmes.

Les chroniques longs termes de suivi des CNPE utilisées pour l'étude thermique du Rhône sont **des sources de données majeures.**

Cependant, elles ont été acquises pour des objectifs de surveillance (différence amont/aval CNPE) et se révèlent peu appropriées pour l'étude des mécanismes de la dynamique des peuplements.

Un premier niveau d'information a été obtenu quant aux **effets de l'activation de leviers hydrauliques sur le bassin versant dans l'optique d'abaisser la température du Rhône lors d'épisodes caniculaires.**

En savoir plus : www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr / (rubrique Rhône)





ÉTUDES MENÉES CONJOINTEMENT PAR





EDF
Délégation de Bassin Rhône Méditerranée
Le Primat
190 rue Garibaldi
69003 LYON

www.edf.com

Conception : A P A C H E
2016 - Crédits photos : EDF - Carlos Braun, Matthieu Colin, Patrice Dhumes, Robert Fhal, Frederick Jacob - Shutterstock.
Le groupe EDF est certifié ISO 14 001