

## Évolution thermique du Rhône : apport des longues chroniques de température de l'eau pour distinguer les effets des aménagements de l'incidence climatique

Thermal evolution of the Rhône River: using long-term time-series temperature data to distinguish between the influence of climate change and the effects of water resource infrastructure along the river

Alain Poirel<sup>1</sup>, Sébastien Langlais<sup>1</sup>, Clément Duvert<sup>2</sup> et Victor Baron<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EDF-DTG, 21 av. de l'Europe, BP41, 38040 Grenoble (Auteur correspondant : [alain.poirel@edf.fr](mailto:alain.poirel@edf.fr)). <sup>2</sup> Queensland University Of Technology, Brisbane, Australie.

### RÉSUMÉ

De longues séries de températures ont pu être reconstituées par modélisation statistique (Réseaux de Neurones), sur la période [1920-1976]. Ces données complètent les mesures disponibles sur la période [1977-2010] sur la partie française du Rhône et au niveau de ses principaux affluents.

Depuis 1920, les températures de l'eau ont enregistré une augmentation significative sur le Rhône (entre +0.4°C et + 2.1°C) et sur certains de ses affluents (+1.6°C sur la Saône).

Les rejets thermiques des Centres Nucléaires de Production d'Électricité et le réchauffement climatique sont les 2 principaux facteurs expliquant l'évolution des températures du Rhône. Les rejets des CNPE augmentent les moyennes annuelles de température entre +0.5°C à l'amont et +1.2°C à l'aval du fleuve. Les aménagements du Rhône (barrage et chenalisation), en modifiant l'hydraulique du fleuve, ont également modifié les échanges thermiques entre le cours d'eau et l'atmosphère.

Ces longues chroniques permettent de mettre en perspective les résultats des suivis récents (thermique et hydrobiologique) avec l'évolution séculaire de la thermie du fleuve, dans un contexte d'évolution climatique.

### ABSTRACT

Artificial neural network modeling was used to generate temperature time-series for the Rhône River and its main tributaries for the 1920-1976 period. Historical 1977-2010 temperature records were then augmented with these newly computed time-series data. Examination of the reconstituted 90-year records indicates that temperatures in the Rhône River substantially increased since 1920, with values ranging between +0.4°C and +2.1°C.

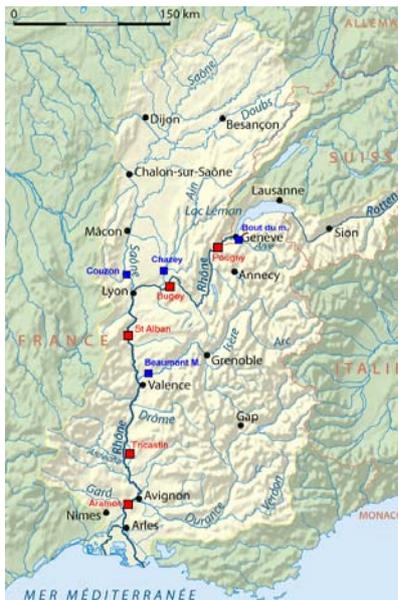
The sensitivity of temperatures to natural and anthropogenic drivers of the river's thermal regime was also assessed. Numerical simulations suggest that (i) water resource infrastructure such as dams and channelized reaches had a buffering effect on the temperature of the river, and (ii) thermal discharge originating from the nuclear power plant cooling systems located along the river led to localized increases in mean annual temperatures, which ranged from +0.5°C upstream to +1.2°C downstream.

Overall, the multi-decadal time-series obtained in this study provided insight into the long-term evolution of the thermal regime of the Rhône River and its tributaries. Our work also proved valuable in giving context to the more detailed (thermal and biological) monitoring that has been conducted in the recent years.

### MOTS CLES

Température, Rhône, Léman, CNPE, débit.

# 1 RECONSTITUTION DES CHRONIQUES ANCIENNES DE TEMPERATURES DU RHONE, PAR MODELISATION STATISTIQUE



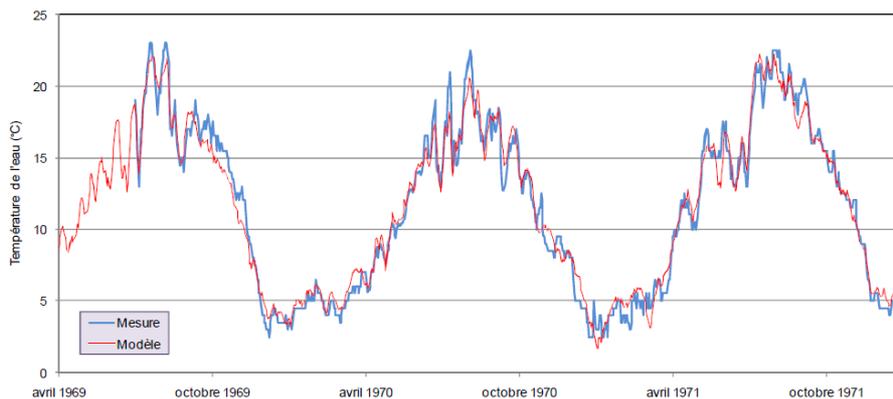
9 Stations où Teau a été étudiée

Contrairement aux données sur la température de l'eau, qui ne sont disponibles en général que depuis 1977, les débits et les températures de l'air sont mesurés depuis *a minima* 1920.

Les chroniques de température de l'eau (mesures [1977-2010]) ont été étendues par modélisation de type Réseaux de Neurones à la période [1920-1976] (Langlais *et al.*, 2014), pour les 5 stations du Rhône (Pougny, Bugey, Saint-Alban, Tricastin et Aramon) et les 4 stations de ses affluents majeurs (Arve, Ain, Saône et Isère).

Le schéma conceptuel retenu est structuré autour de modèles « en cascade » dans lesquels, le modèle amont alimente le modèle aval en données de température de l'eau. Pour le modèle le plus amont (Pougny), la température de l'eau a été reconstituée indirectement en reproduisant les « gouttes froides » sur la base des variations du champ de pressions. Ce type de modélisation statistique consiste à faire « apprendre » au modèle les relations (pouvant être non linéaires) entre la température de l'eau et certains paramètres explicatifs pertinents, comme la saison, l'hydro-climatologie, les rejets thermiques des Centres Nucléaires de Production d'Électricité (CNPE), et les volumes des aménagements hydrauliques.

Les modèles RN peuvent être considérés comme performants, par rapports aux objectifs de l'étude, avec des erreurs moyennes comprises entre 0.5 et 1.0°C, suivant les stations. La précision des mesures de températures a évolué de 0.5°C dans les années 1970 à 0.3°C ces dernières années.

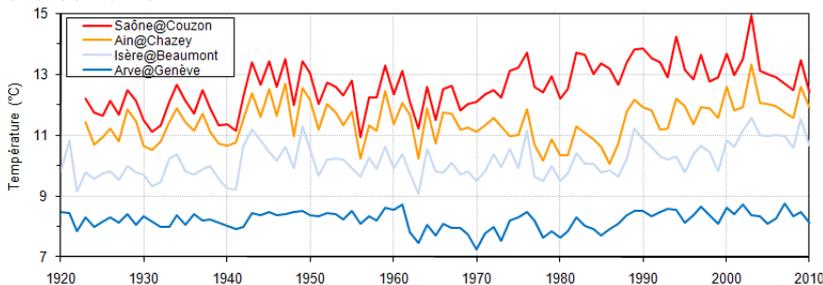


Comparaison entre les températures d'eau mesurées et modélisées, à Bugey

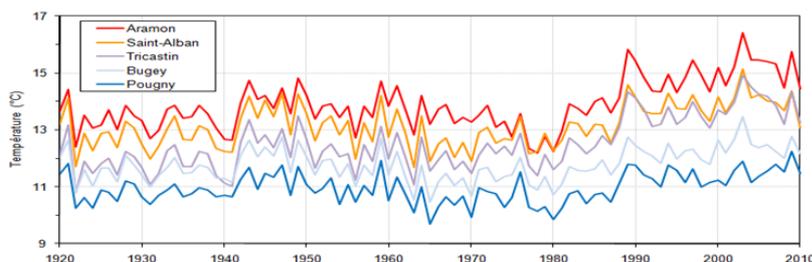
## 2 ORIGINES DE L'EVOLUTION DES TEMPERATURES ENTRE 1920 ET 2010

Les débits moyens annuels 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, notamment à partir des années 1960, avec une diminution des débits en été (-30%) et une augmentation des débits hivernaux (+30%). 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. 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.

L'augmentation séculaire [1920-2010] de la température annuelle moyenne de l'eau est généralisée sur le linéaire du Rhône, avec des intensités inégales : +0.4°C à Pougny, +0.6°C à Bugey, +0.9°C à Saint-Alban, +1.6°C à Aramon, +2.1°C à Tricastin. Elle est de +1.6°C sur la Saône alors qu'elle est imperceptible sur l'Arve. L'élévation séculaire des températures moyennes du mois le plus chaud de l'année (août en général) est 1.4 à plus



de 2 fois supérieure (e.g. +3.5°C, en août à Aramon) à l'augmentation des moyennes annuelles. La mise en perspective de 2003 dans la chronique séculaire montre le caractère exceptionnel de cette année qui concentre tous les *maxima* depuis 1920. L'année 1987, correspond à une période charnière pour les températures du Rhône et de l'air (ADEME-MF., 2011).

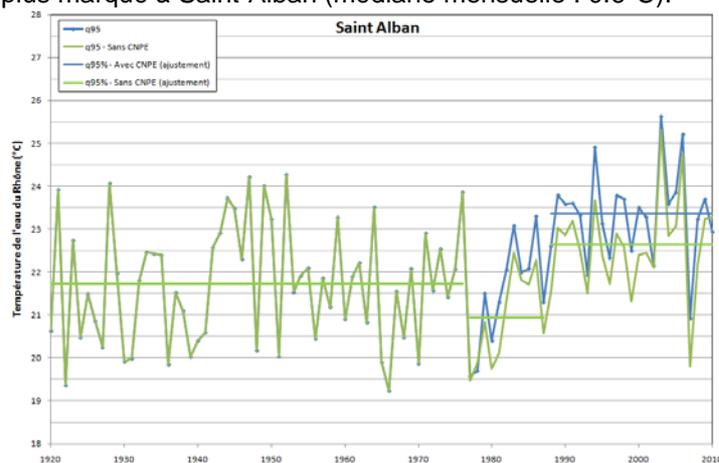


Chroniques de températures du Rhône reconstituées par modélisation

L'augmentation séculaire de la température de l'eau n'a pas été linéaire, mais quasi-intégralement portée par la hausse des températures entre [1987-2010], avec une stabilisation relative depuis 2007.

L'analyse des 2 chroniques anciennes de températures de l'eau (à Lyon et en sortie Léman, dans les années 1870) montre que les processus d'échange entre l'air et l'eau ont été modifiés par des effets anthropiques. Entre le Léman et Lyon, l'anthropisation du fleuve a augmenté son inertie (approfondissement de sa section, diminution des frottements, réduction des surfaces d'échanges air/eau que ne compense pas l'augmentation des temps de séjour). Les modèles calés sur ces données anciennes laissent supposer que le Rhône aurait été 1°C plus chaud lors de canicule de 2003, dans sa configuration de 1870 (*i.e.* sans aménagements hydrauliques notoires).

Les aménagements hydrauliques sur le Rhône français ont un effet sur le régime thermique du fleuve, qui dépasse rarement 0,5°C. Ces retenues jouent un rôle tampon (lissage) caractérisé par une baisse de la variabilité des températures et par une augmentation 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).



Évolution des températures les plus élevées de l'année (q95%) en simulant l'absence de rejets thermiques des CNPE

En enlevant les rejets thermiques (fonction de la puissance des CNPE), il a été possible de simuler la part relative des CNPE dans la température observée plus en aval. Les échauffements des CNPE sont caractérisés par une grande variabilité journalière liée aux débits (dilution) et à la puissance produite (50% des échauffements < 1.5°C). Sur la période [1988-2010], les simulations « avec » et « sans rejets thermiques des CNPE » montrent, un échauffement résiduel du Rhône lié aux rejets des CNPE, de 0.5°C à Saint-Alban, 0.6°C à Tricastin et 1.2°C à Aramon (en moyennes annuelles).

Ces rejets thermiques augmentent le quantile « chaud » q95% des températures de l'eau, de 0.7°C à Saint-Alban, 0.8°C à Tricastin et 1.6°C à Aramon. Durant ces épisodes chauds, l'effet des CNPE est limité par une baisse de puissance, pour respecter les limites réglementaires de température aval. Afin de disposer d'indicateurs pertinents pour l'écologie, chaque cycle annuel de température a été analysé en déterminant une série de Fourier associée. Les rejets thermiques des CNPE sont à l'origine d'une anticipation limitée (précocité) des cycles annuels de température du Rhône (date de dépassement du seuil à 12°C) de 3 (Saint-Alban) à 8 jours (Aramon), en sachant que la variabilité interannuelle « naturelle » est d'1 mois. Les rejets thermiques des CNPE (entre Saint-Alban et la mer) et le réchauffement climatique sont les deux facteurs principaux à l'origine du réchauffement des eaux du Rhône.

**NB.** Les informations présentées dans cette communication sont issues de l'Étude Thermique du Rhône (Phase 4), financée par l'Agence de l'Eau RMC, l'Union Européenne (FEDER) et EdF.

## BIBLIOGRAPHIE

Langlais S., Duvert C., Perret Ch. and Poirel A. (2014). Relations entre hydrologie et thermie du Rhône. Lot 5 de l'Étude Thermique du Rhône Phase 4. Rapport EDF.

ADEME-MétéoFrance (2011). Changement climatique au 20e siècle en Languedoc-Roussillon.