

---

## **L'APPORT DE L'ANALYSE EN COMPOSANTES INDÉPENDANTES DANS L'IDENTIFICATION DE SIGNAUX ISSUS DE SÉRIES TEMPORELLES**

*Bruno DARDAILLON (\*), Frédéric GRESSELIN (\*\*), Faïcel  
CHAMROUKHI (\*\*\*)*

*(\*) DREAL Normandie, Laboratoire Mathématiques Nicolas Oresme,  
Université de Caen Normandie*

*(\*\*) DREAL Normandie, Laboratoire Morphodynamique  
Continente et Côtière UMR 6143 Université de Caen  
Normandie*

*(\*\*\*) Laboratoire Mathématiques Nicolas Oresme, Université  
de Caen Normandie*

[bruno.dardaillon@developpement-durable.gouv.fr](mailto:bruno.dardaillon@developpement-durable.gouv.fr)

**Mots-clés :** *Analyse en Composantes Indépendantes (ACI),  
Identification de signaux, Température des cours d'eaux  
normands, barrage, ripisylve*

**Domaine concerné :** *Séries temporelles, Analyse de données*

---

### **Résumé**

L'Analyse en Composantes Indépendantes (ACI) est une méthode statistique dédiée à l'étude de séries temporelles complexes. Son

utilisation s'applique ici à la caractérisation des facteurs de contrôle du régime thermique de deux cours d'eau normands : la *Sélune*, qui se jette en Baie du Mont-St-Michel, et *l'Odon* qui traverse la partie Sud-Ouest de l'agglomération caennaise. Chacune de ces rivières a été équipée de trois sondes thermiques qui mesurent au pas bi-horaire la température de l'eau, un des paramètres essentiels de l'écologie des cours d'eau. Les séries étudiées s'étendent de 2011 à 2021. Elles sont produites par la DREAL (Direction Régionale de l'Aménagement et du Logement) de Normandie.

L'ACI permet de caractériser pour *l'Odon* la façon dont évolue d'amont en aval, selon la durée de résidence de l'eau dans le milieu et l'élargissement progressif de la rivière, l'influence de facteurs climatiques saisonniers et journaliers. Pour la *Sélune*, l'étude statistique permet de qualifier et de quantifier l'impact de deux barrages sur le régime thermique du cours d'eau et de mettre en évidence l'influence du démantèlement de l'un d'entre eux sur ce régime.

L'analyse révèle également la difficulté d'interpréter des séries temporelles acquises dans un milieu vivant, à la fois influencé par la variabilité des facteurs climatiques mais aussi par celle de facteurs environnementaux locaux comme l'ombre des arbres de la ripisylve, qui varie selon les saisons, ou la circulation des sédiments dans la rivière qui peut entraîner des modifications des conditions de mesure.

L'étude permet enfin de souligner l'importance d'équiper les rivières d'un nombre suffisant de stations réparties entre l'amont et l'aval, ce qui est rarement le cas dans les réseaux thermiques patrimoniaux, si l'on souhaite caractériser l'évolution dans l'espace et le temps des facteurs de contrôle les plus influents.

## Abstract

Independent Component Analysis (ICA) is a statistical method dedicated to the study of complex time series. Its use applied here to the characterization of the control factors of the thermal regime of two Norman rivers: the *Sélune*, which flows into the Bay of Mont-St-Michel, and the *Odon* which crosses the South West part of the Caen conurbation. Each of these rivers has been equipped with three thermal probes which measure the water temperature on a bi-hourly basis, one of the essential parameters of the ecology of watercourses. The series studied extended from 2011 to 2021. They were produced by the DREAL (Regional Directorate for Environment Planning and Housing) of Normandy.

The ICA made it possible to characterize for the *Odon* the way in which the influence of seasonal and daily climatic factors evolves from upstream to downstream, according to the residence time of the water in the environment and the progressive widening of the river. For the *Sélune*, the statistical study made it possible to qualify and quantify the impact of two dams on the thermal regime of the river and to highlight the influence of the dismantling of one of them.

The analysis also revealed the difficulty of interpreting time series acquired in a living environment, both influenced by the variability of global climatic factors but also by that of local environmental factors such as the shade of trees in the riparian forest, which vary with the seasons, or the circulation of sediments in the river which can lead to changes in the measurement conditions.

Finally, the study highlighted the importance of equipping rivers with a sufficient number of stations distributed between upstream and downstream, which is rarely the case in temperature networks, if one wishes to characterize the evolution in space and time of the most influential control factors.

## 1. Introduction

La température est un paramètre clef de l'écologie des rivières qui influence le cycle de vie des espèces et certains usages (Magnuson et al. [1] ; Ebersole et al. [2] ; Daufresne et Boët [3] ; Caissie [4]; Comte et al. [5]). Elle joue sur la croissance des poissons (Wieser et al. [6] ; Wolter [7]), leur reproduction et sur le développement des embryons et des larves (De Vlaming [8]). De nombreux organismes lotiques étant poïkilothermes, leur température corporelle dépend de la température du milieu environnant. Ils sont sensibles non seulement à la température instantanée mais aussi aux variations de température quotidiennes, saisonnières ou annuelles. Ils déterminent leurs habitats et leurs déplacements selon des critères thermiques précis, propres à chaque espèce et à leur stade de développement (Souchon & Tissot [9]). Les espèces les plus thermosensibles comme les salmonidés doivent chercher des refuges thermiques pour minimiser l'exposition aux températures élevées en période de fortes chaleurs. L'augmentation globale de la température attendue avec le changement climatique est donc une contrainte majeure pour ces espèces, ainsi que la réduction des débits d'étiage.

La température joue également sur la solubilité de l'oxygène dans l'eau. La concentration de l'oxygène dissous diminue en effet lorsque la température augmente (Whitehead et al.[10]). L'oxygène dissous agit sur la capacité d'un milieu à recycler les nutriments et à décomposer la matière organique. Il s'agit donc également d'un facteur essentiel des chaînes trophiques des cours d'eau. L'oxygène dissous est par ailleurs indispensable à la respiration de la plupart des espèces aquatiques.

En France, la plupart des grands fleuves sont suivis en température depuis les années 1970 ou 1980 (Moatar & Gailhard [11] ; Poirel et al. [12] ; Larnier et al. [13]), notamment dans le cadre de la production d'électricité. La surveillance environnementale de la température des rivières, nécessaire à la compréhension du

fonctionnement écologique des milieux aquatiques, s'est généralisée à partir de 2008 grâce à la création d'un réseau national par l'Office Français de la Biodiversité (OFB, <http://naiades.eaufrance.fr/>). En Normandie, la Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement (DREAL) a équipé de nombreuses rivières pour étendre le réseau national et surveiller environ un tiers des 18 000 km de rivières normandes.

La mesure en continu de la température de l'eau, facilitée par l'apparition de data-loggers numériques, permet d'étudier finement ses variations. Les régimes thermiques sont principalement contraints par des facteurs atmosphériques qui agissent à l'échelle du site, du bassin versant ou à des échelles plus larges encore (Webb & Walling [14] ; Poole & Berman [15] ; Webb et al. [16] ; Ryan et al. [17] ; Hannah & Garner [18] ; Jones et Schmidt [19]). L'échange de chaleur entre l'atmosphère et l'eau et, dans une moindre mesure, entre le cours d'eau et les aquifères contrôle la majeure partie des variations thermiques des grandes rivières (Sinokrot & Stefan [20] ; Evans et al. [21] ; Lalot et al. [22]). Ces échanges sont d'autant plus déterminants que l'eau réside durablement dans le milieu et que celui-ci s'élargit. La température de l'eau augmente ainsi d'amont en aval avant d'atteindre son point d'équilibre avec un gradient moyen d'environ 0,1°C/km pour les grands cours d'eau de plaine (Torgersen et al. [23]). Le débit, la géomorphologie, le couvert végétal des zones riveraines, ainsi que l'aménagement hydraulique et terrestre, sont des facteurs secondaires qui influencent temporairement ou localement les régimes thermiques (Kelleher et al. [24] ; Arismendi et al. [25] ; Ryan et al. [26] ; Johnson et al. [26] ; Jackson et al. [27] ; Garner et al. [28] ; Dugdale et al. [29] ; Beaufort et al. [30]). Les réservoirs de barrage ont généralement des impacts significatifs sur les températures des cours d'eau (Webb & Walling [31] ; Poirel et al. [32] ; Seyedhashemi et al. [33]). Les grands barrages ont tendance à réduire la température des cours d'eau en été et à modifier les cycles annuels, tandis que les étangs et les réservoirs peu profonds

(d'une hauteur inférieure à 15 mètres) ont tendance à augmenter la température des cours d'eau (Seydedhashemi et al. [33]). Le rayonnement solaire chauffe les couches superficielles de l'eau dans les lacs, les réservoirs et les étangs plus rapidement qu'il ne réchauffe les eaux plus profondes. Même les petits barrages (chutes d'eau inférieures à 2 mètres) peuvent influencer considérablement les régimes thermiques des rivières et contribuer à élever leur température de manière significative (Chandesris et al. [34]). Les impacts dépendent de la surface, de la profondeur et du temps de séjour dans la retenue. Les cours d'eau influencés par la présence de retenues ont ainsi une signature thermique différente des cours d'eau dits naturels. Dans le bassin de la Loire (nord-ouest de la France), leur température médiane est supérieure à celle de l'air tout au long de l'année (Seydedhashemi et al. [33]).

Nous avons choisi d'étudier ici le régime thermique de deux cours d'eau normands, l'un influencé par des barrages, la *Sélune*, l'autre disposant d'un fonctionnement plus naturel, l'Odon. Chacune de ces rivières a été équipée de trois sondes de température, ce qui permet d'analyser l'évolution amont / aval du régime thermique ainsi que celle des facteurs le régissant. L'étude des régimes thermiques est conduite par l'Analyse en Composantes Indépendantes (ACI). C'est une méthode statistique peu utilisée en hydrologie mais qui a révélé tout son intérêt dans l'étude de la température de deux autres cours d'eau locaux : l'Orne et la Touques (Gresselin et al.[35]). L'ACI permet de décomposer les signaux thermiques en différentes sources statistiquement indépendantes dont l'analyse permet de révéler les facteurs de contrôle qui les déterminent.

## **2. Aspects Méthodologiques de l'Analyse en Composantes Indépendantes (ACI)**

L'analyse en composantes indépendantes permet d'identifier les facteurs cachés qui sous-tendent les ensembles de données

multivariées observées, sans connaissance préalable des mécanismes de mélange. Elle décompose ainsi un ou plusieurs signaux aléatoires multivariés  $X \in \mathbb{R}^m$  en une combinaison linéaire de signaux indépendants tel que :

$$X = AS$$

avec  $X = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$ ,  $S$  une matrice à composantes indépendantes de type  $S = [s_1, s_2, \dots, s_m]^T$  et  $A$  une matrice à coefficients ou matrice de mélange. Cette représentation à la notation matricielle suivante  $X = A*S$ , où  $X = (X_1, \dots, X_n)$  est la matrice de l'ensemble des signaux et  $S = (S_1, \dots, S_n)$  est la matrice de l'ensemble des sources.

La décomposition des séries observées en plusieurs sources indépendantes vise ainsi à estimer à la fois  $A$  et  $S$  avec deux hypothèses principales. La première est, que les composantes inconnues soient statistiquement indépendantes et la seconde, qu'il y ait au plus une distribution gaussienne dans l'une des composantes indépendantes.

Au final, chacune des composantes indépendantes  $S$  est représentée par un graphique et une matrice  $A$  de pondération. Le graphe représente l'évolution du signal élémentaire dans le temps. La matrice  $A$  propose les variations d'amplitude du signal d'une station à l'autre.

Le traitement statistique a été réalisé à l'aide des logiciels libres OpenOffice et R et le package Fast-ICA en libre accès sur R, *Fast-ICA* (Hyvärinen & Oja [36] ; Marchini et al.[37]). Cet algorithme est en effet adapté pour estimer la matrice de mixage  $A$  et la matrice source  $S$ . Les données sont centrées par *Fast-ICA*, la recoloration des séries initiales est ainsi possible par le produit de  $AS$  auquel il faut ajouter la moyenne des séries étudiées.

La principale limite de cette méthode est qu'il n'est pas possible d'extraire plus de composantes du signal qu'il n'y a de jeux de variables analysées. Ainsi, dans notre cas, les 3 sondes thermiques sur l'*Odon* et la *Sélune* restreignent le nombre de sources maximales à 3 pour chaque cours d'eau.

### **3. La zone d'étude**

#### **3.1. Le bassin de la Sélune**

La *Sélune* est l'un des 3 fleuves côtiers se jetant en baie du Mont-Saint-Michel dans le Nord-Ouest de la France (fig. 1). Son bassin versant s'étend sur près de 1100 km<sup>2</sup>. Il draine un ensemble de collines formées dans des terrains schisto-gréseux et granitiques du Massif armoricain. La *Sélune* parcourt ce territoire sur 76 km environ. Deux barrages hydroélectriques y ont été construits dans la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle, à quelques kilomètres de l'embouchure du fleuve : les barrages de Vezins et de la Roche-Qui-Boit, d'une hauteur respective de 36 et de 16 mètres. Dans le cadre de la reconquête du bon état écologique des cours d'eau, l'État français a décidé en 2009 l'arasement de ces infrastructures qui constituaient des obstacles infranchissables pour certaines espèces comme l'anguille européenne, en forte régression. Le barrage de Vezins a été détruit en 2019, le démantèlement de celui de la Roche-Qui-Boit est programmé pour 2022.

Trois sondes thermiques nommées d'amont en aval Se1, Se2 et Se3 ont été implantées dans la *Sélune*. La sonde Se1 se situe juste en amont de la retenue du barrage de Vezins. La *Sélune* est en ce site un milieu ouvert, d'une vingtaine de mètres de large et fortement exposé aux influences atmosphériques. La station Se2 est localisée à une centaine de mètres en aval du barrage. Le site est davantage boisé et le lit mineur de la rivière s'étend sur 19 mètres de large



(condition avant arasement du barrage). La station Se3 se situe à quelques kilomètres en aval du barrage de la Roche-Qui-Boît. La rivière fait 22 m de large environ en cet endroit.

### **3.2. Le bassin de l'Odon**

Le bassin versant de l'Odon est de taille plus modeste (217 km<sup>2</sup>). L'Odon le parcourt sur 49 km de long avant de se jeter dans l'Orne à Caen, en condition estuarienne. L'Odon coule dans le Massif armoricain sur l'essentiel de son cours avant de rentrer dans le Bassin parisien à l'approche de sa confluence avec l'Orne. Il draine une succession de collines formées principalement de schistes et de grès.

Comme la *Sélune*, l'Odon est équipé de trois stations thermiques, nommées d'amont en aval Od1, Od2 et Od3. La rivière est étroite en chacun de ces sites (2 à 3 mètres de large) et bordée d'une ripisylve assez dense. En Od3, l'Odon est plus ombragé car protégé du soleil par un versant boisé qui le borde au Sud et à l'Est.

## **4. Data**

La *Sélune* et l'Odon ont été équipées par la DREAL de Normandie d'enregistreurs de température HOBO® water Temp Pro v2 (U22-001) de précision  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ . Les sondes sont fixées aux racines des arbres de la zone riveraine, dans un endroit ombragé et à une profondeur garantissant, sauf pour Se2, leur immersion complète en tout temps. La température est mesurée toutes les deux heures. Les chroniques étudiées vont du 1<sup>er</sup> janvier 2012 au 7 juin 2021. Chaque série est composée de 41 349 observations.

Située au pied du barrage de *Veziens*, la sonde Se2 a été régulièrement exondée pendant les périodes de constitution de la charge hydraulique nécessaire à la production d'électricité par éclusées. À partir de la destruction du barrage, la sonde Se2 s'est trouvée enfouie sous une épaisse couche de sédiments.

Figure 1 : Localisation des sondes thermiques sur la Sélune et l'Odon



## 5. Principales caractéristiques de l'évolution des températures de l'Odon et la Sélune

Les températures des deux cours d'eau (Annexe 1) évoluent selon une cyclicité saisonnière. Elles sont fraîches l'hiver et plus élevées l'été.

Les températures minimales sont proches de 0°C pour l'*Odon* et la *Sélune* amont et d'environ 3°C pour la *Sélune* aval. La Sonde Se2 a un minimum thermique très inférieur à 0°C ce qui signifie qu'elle n'a pas toujours été émergée et qu'elle a été amenée à mesurer temporairement la température de l'air. Cette sonde est située au pied du barrage de *Veziins* qui produisait de l'électricité par éclusées et qui est désormais démantelé. La température moyenne des deux cours d'eau s'élève d'amont en aval. Pour l'*Odon*, le réchauffement atteint 1°C. Il est moindre pour la *Sélune*, de l'ordre de 0,7 degré.

Tableau 1 : Statistiques des températures pour chaque sonde thermique

Unité : degrés

Sondes	Od1	Od2	Od3	Se1	Se2	Se3
Minimum	0,41	-0.004	-0.088	-0.088	-5.916	3.063
1 <sup>er</sup> quartile	7.845	8.344	8.494	8.742	8.767	8.742
Médiane	10.271	10.858	11.200	11.734	11.759	12.606
Moyenne	10.383	11.282	11.579	12.157	12.194	12.857
3 <sup>ème</sup> quartile	13.088	14.385	14.888	15.676	15.533	17.058
Maximum	21.533	22.345	22.489	25.695	28.593	25.237

Les maxima mesurés sont nettement supérieurs pour la *Sélune* qui est une rivière plus large et moins ombragée que l'*Odon*. Les stations sur la *Sélune* sont par ailleurs plus éloignées des sources que celles de l'*Odon* (Annexe 2) ce qui joue sur la durée d'exposition de l'eau aux facteurs climatiques et donc sur la température.

## **6. Analyse en composantes indépendantes (ACI)**

À titre de comparaison, deux séries d'ACI ont été produites sur les deux rivières. La première porte sur l'extraction de deux composantes par série de données (une série par rivière), la seconde sur l'extraction de trois composantes par série.

### **6.1. ACI à deux composantes**

#### **6.1.1. Séries de l'*Odon***

Les deux composantes extraites (cf. Annexe 4) sont l'expression de deux sources différentes.

D'une part, une source saisonnière est identifiée, dénommée CO1 dans la suite de l'article. Elle présente une forte amplitude (environ 16°C) avec un maximum thermique en été et un minimum en hiver. L'amplitude du signal croît d'amont en aval. Le coefficient de la matrice évolue effectivement de 3,1 à 3,9 de Od1 en Od3. Des variations thermiques fréquentes, plus ou moins régulières et supra-journalières se surimposent à la cyclicité saisonnière de la composante CO1.

D'autre part, une source journalière à variabilité saisonnière est identifiée, dénommée CO2. Son amplitude maximale est inférieure à celle de CO1. Elle atteint 5°C certaines années et correspond à des variations thermiques induites par les alternances jour et nuit. CO2 atteint son maximum d'amplitude en début de printemps et non au solstice d'été, période de l'année où la durée du jour est la plus grande. Son minimum d'amplitude, d'environ 1°C, survient en fin d'année quand le rayonnement solaire est au plus bas. L'amplitude du signal augmente de fin décembre au mois de mai pour décliner ensuite. Certaines années cependant, le signal peut de nouveau s'amplifier en automne comme en 2018 ou en 2020, alors que les jours déclinent. Cette source à haute fréquence a une variabilité

interannuelle assez élevée. Sur la période étudiée, l'amplitude du signal diminue d'amont en aval pour être quasiment nul en Od3. À ce stade, CO2 apparaît comme une source multifactorielle contrôlée en partie par la variabilité de l'intensité du rayonnement solaire survenant entre l'hiver et l'été et la journée (cycle nyctéméral).

### 6.1.2. Séries de la Sélune

Les deux composantes extraites par l'ACI des séries thermiques de la *Sélune* (Annexe 5) possèdent les caractéristiques suivantes.

La première composante notée CS1, comme CO1, est une composante saisonnière à laquelle se surimposent des variations thermiques plus ou moins régulières, fréquentes et supra-journalières. Le cycle saisonnier dispose d'une amplitude s'accroissant d'amont en aval (les coefficients matriciels passent de 4,11 à 4,63), avec un minimum en hiver et un maximum en été. L'amplitude atteint son maximum sur le cycle 2017 / 2018 soit environ 16°C en Se1 et 18°C en Se3. Ces variations d'amplitude sont supérieures à celles observées pour l'*Odon*.

Quant à la seconde composante, notée CS2, elle est erratique de 2011 à 2019 puis acquiert une nette saisonnalité à partir de 2019. Elle porte des variations hautes fréquences et de grandes amplitudes particulièrement visibles en début de chronique. Ces variations s'estompent de 2014 à 2018 avant de disparaître définitivement en 2019. Au fur et à mesure de l'espacement et de la diminution d'amplitude de ces variations, émerge de la chronique un signal de cyclicité saisonnière. Cette saisonnalité commence à apparaître clairement à partir de 2014 mais semble déjà présente en 2012 et 2013. Elle disparaît en 2019 au profit d'un autre cycle saisonnier qui est en opposition de phase (les maximums entre les deux cycles surviennent à quelques mois d'intervalle). La matrice de passage de CS2 montre que le signal est principalement porté par la

sonde Se2. Pour les deux autres stations, les coefficients de la matrice de passage sont effectivement très faibles. À ce stade, bien que cette composante apparaisse multi-source, il semble logique de considérer que les variations thermiques qu'elle représente sont liées à l'activité par écluses du barrage de *Vezi*ns. Ce barrage qui produisait de l'électricité a été détruit en 2019 (Annexe 3), ce qui correspond à une des principales modifications de la structure du signal observé. L'arasement du barrage a modifié fortement les conditions de site. Lors du dernier relevé de données, en juin 2021, la sonde Se2 a été retrouvée enfouie sous une épaisseur notable de sédiments. De 2019 à 2021, le signal thermique représenté par CS1 semble donc correspondre à celui d'un milieu confiné, protégé des influences directes de l'atmosphère et de l'eau et de faible variabilité thermique.

## **6.2. ACI à trois composantes**

### **6.2.1. Séries de l'*Odon***

L'ACI à trois composantes (Annexe 6) permet de confirmer la présence pour l'*Odon* d'un signal journalier à variabilité saisonnière (CO2a) et d'un signal saisonnier influencé par une source supra-journalière (CO3a).

La troisième composante (CO1a) se révèle être liée, ainsi que l'indique sa matrice, à des phénomènes survenant principalement en Od2. En effet, les coefficients matriciels sont presque nuls pour les stations Od1 et Od2.

Le premier des événements particuliers porté par ce signal survient en début d'automne 2016 en lien avec un refroidissement brutal du temps. Ce refroidissement est enregistré par les trois stations (annexe 1) mais avec une amplitude beaucoup plus forte en Od2 qu'en Od1 et Od3. Il s'agit de conditions locales de site qu'il reste encore à expliquer (plus grande exposition aux vents d'Est, forte

distance par rapport à la mer, qui tempère les variations brutales de température, site plus distant des sources de l'*Odon*, l'eau souterraine tamponnant les variations thermiques des cours d'eau ...).

Le second événement qui singularise la série Od2 par rapport aux deux autres chroniques débute en juin 2017 et se termine en début d'année 2018. Durant cette période, le signal journalier de l'*Odon* s'estompe progressivement pour entièrement disparaître (annexe 7) tandis que le cycle thermique se déphase par rapport aux stations amont (Od1) et aval (Od3). En l'absence de travaux sur le cours d'eau, l'événement semble imputable à l'enfouissement progressif de la sonde sous du sédiment avant que deux petites crues ne l'en dégagent (annexe 7).

### **6.2.2. Séries de la Sélune**

Les trois composantes extraites par l'ACI (annexe 8) présentent les caractéristiques suivantes.

La source CS3a est équivalente au signal CS1 précédemment décrit. Il s'agit d'une source à forte amplitude saisonnière à laquelle se surimposent de nombreux événements supra-journaliers. Son amplitude augmente d'amont en aval.

La composante CS1a est un signal haute fréquence, erratique jusqu'en 2018 mais structuré à partir de 2019. Il apparaît alors constitué d'une source haute fréquence, journalière, variant en amplitude d'hiver en été. Ce signal s'apparente au signal CO2 de l'*Odon* sauf que ce dernier croît de décembre en avril pour décroître progressivement ensuite alors que CS1a croît jusqu'en été. Ce signal n'est cependant présent que sur une courte période et il paraît difficile de se prononcer définitivement sur cette différence.

Enfin, la composante CS2a est un signal lié presque exclusivement à la station Se2, située au pied du barrage de Vezins, ainsi qu'en

attestent les coefficients de sa matrice. Il est proche de CS2 mais est mieux structuré que ce dernier. De 2012 à 2018, CS2a présente une cyclicité saisonnière, de faible amplitude, avec un minimum hivernal, proche de 0, et un maximum estival proche de 1. La source à l'origine de ce cycle contribue donc à réchauffer l'eau en été d'environ 1,5°C. Elle n'a pas d'effets notoires en hiver (léger refroidissement en 2017). Ce cycle disparaît en 2019 au bénéfice d'un autre cycle, saisonnier lui aussi, mais en opposition de phase. La source qui le contrôle contribue à réchauffer l'environnement en Se2 en hiver, modérément, d'environ 1,5°C, et à le refroidir en été, d'environ 4°C. Le cycle est centré sur celui des saisons. La modification de source survient au moment de l'arasement du barrage.

La composante CS2a porte également un signal haute fréquence, irrégulier, très présent en début de série et disparaissant définitivement en 2019. Ces variations thermiques ne sont pas présentes en début d'années 2014, 2015 et 2016. Ces périodes correspondent à celles durant lesquelles le débit de la *Sélune* n'est pas influencé par des éclusées (annexe 9).

## **7. Interprétations et discussion**

L'analyse a porté sur l'extraction par ACI de 10 composantes indépendantes depuis 6 chroniques thermiques produites par la DREAL de Normandie sur l'*Odon* et la *Sélune*.

### **7.1. Détection par l'ACI du rôle du climat et ses variations saisonnières dans le régime thermique des deux cours d'eau**

Quatre de ces composantes (CO1, CS1, CO3a et CS3a), très proches l'une de l'autre, correspondent à un signal de forte amplitude, de cyclicité saisonnière. Ce signal est plus ample pour la *Sélune*, pour



laquelle il atteint un maximum de 18°C, que pour l'*Odon* (16°C maximum). Son amplitude s'accroît d'amont en aval quelle que soit la rivière, au fur et à mesure que les effets des échanges entre l'eau et l'atmosphère s'accroissent, par un effet cumulatif lié à l'éloignement à la source des cours d'eau et par une exposition accrue de la surface d'échange liée à l'élargissement du cours d'eau.

La différence d'amplitude entre l'*Odon* et la *Sélune* s'explique par des largeurs différentes de cours d'eau, l'*Odon* étant un petit cours d'eau par rapport à la *Sélune* au niveau des sites instrumentés.

Le cycle observé est déphasé d'une dizaine de jours par rapport aux solstices d'hiver et d'été ce qui est le cas de la température de l'air en Normandie. Ce retard est lié à l'inertie thermique de la mer et des sols qui sont deux réservoirs de chaleur qui agissent sur le climat local, en lien avec l'atmosphère.

En raison d'un nombre restreint de stations de mesure (3 par cours d'eau), l'ACI n'a pas permis d'observer les effets des variations thermiques générées par les successions de temps anticyclonique et cyclonique fréquentes et brutales en Normandie. Cette source secondaire serait susceptible de générer un signal supra-journalier se surimposant au cycle saisonnier.

## **7.2. Détection par l'ACI du rôle du climat et ses variations journalières dans le régime thermique des deux cours d'eau**

Trois des composantes extraites (CO2 et CO2a pour l'*Odon* et la partie terminale de CS1a pour la *Sélune*) portent une signature climatique haute fréquence, multi-source également. Elle est liée aux variations d'énergie reçues par la Terre entre le jour et la nuit (cycle nyctéméral) à laquelle se surimpose l'influence des variations de la durée du jour et d'inclinaison du soleil entre les

solstices d'hiver et d'été. La durée du jour est d'environ 8 heures au solstice d'hiver et 16 heures au solstice d'été en Normandie.

Pour l'*Odon*, cette composante a une intensité maximale au printemps, en mars / avril, alors que les températures sont encore fraîches la nuit mais s'élèvent fortement dans la journée. Son amplitude maximale atteint 5°C pour l'*Odon* amont et diminue vers l'aval.

Pour la *Sélune*, ce signal s'intensifie d'hiver en été, différence significative vis-à-vis de l'*Odon* et qui semble devoir trouver son explication dans les particularités locales des sites instrumentés. La *Sélune* est effectivement un cours d'eau bien plus large que l'*Odon* au niveau des stations de mesure et s'avère ainsi davantage exposée au rayonnement solaire et échanges d'énergie avec l'atmosphère que ne l'est l'*Odon*, protégé par son couvert boisé.

Le signal nycthéméral de la *Sélune* diminue fortement vers l'aval, après que ce cours d'eau a traversé les deux barrages. La présence de ces derniers doit expliquer l'amortissement amont / aval du signal puisque la largeur entre les trois sites est du même ordre de grandeur.

### **7.3. Des singularités de sites et événements particuliers détectés par l'ACI**

Les trois dernières composantes extraites par l'ACI (CO1a, CS2a et CO2) sont imputables à la présence de conditions particulières s'étant déroulées pendant la période de suivi au niveau des stations Od2 pour l'*Odon* et Se2 pour la *Sélune*.

Pour l'*Odon* Od2, deux événements particuliers ont été identifiés par l'ACI. Le premier correspond à une succession de variations brutales de la température de l'eau survenant en fin d'été et en début d'automne 2016. Un de ces pics correspond à un net refroidissement du temps ayant eu davantage d'effet en Od2 qu'en

Od1 et Od3. Il semble que les conditions locales de site soient à l'origine de cette sur-sensibilité climatique. Plusieurs origines peuvent être évoquées sans qu'il soit possible de déterminer laquelle est la plus influente d'entre elles : plus grande distance à la source du cours d'eau qu'en Od1, plus grande distance à la mer qu'en Od3, milieu plus ouvert géographiquement et donc davantage sensible aux vents d'est.

Le second événement est lié, selon notre analyse, à l'enfouissement de la sonde Od2 sous du sédiment pendant quelques mois avant que deux crues hivernales viennent l'en dégager. Cet événement survient en 2017 pendant un étiage très sévère durant lequel des matières en suspension ont pu décanter et enfouir progressivement la sonde. Il peut s'agir aussi du déplacement amont / aval d'un banc de sédiment, définitivement chassé par les crues de fin 2017 / début 2018. Le colmatage est dans tous les cas progressif. Il est intéressant de noter ici que l'ACI a permis le diagnostic de ces deux singularités qu'il aurait été impossible de détecter par la seule analyse visuelle d'une chronique composée de dizaines de milliers de données. Ce diagnostic n'aurait par ailleurs pas pu être conduit si le cours d'eau n'avait été instrumenté que d'une seule station de mesure.

L'ACI a permis de détecter par ailleurs une autre particularité dans les chroniques de l'*Odon* mais en Od3 et dont l'existence est révélée par un coefficient matriciel anormalement bas en cette station pour les composantes CO2 et CO2a et de signe contraire à ceux des stations Od1 et Od2.

Cette anomalie est liée d'une part à une plus faible amplitude du signal nyctéméral en Od3 et d'autre part au déphasage qu'il présente par rapport aux autres chroniques. Ce déphasage survient une grande partie de l'année (annexe 10) et semble devoir être relié à la géographie particulière de la vallée de l'*Odon* en cet endroit. En effet, la vallée est beaucoup plus encaissée en Od3 qu'elle ne l'est

en Od1 et Od2. L'*Odon* y coule au pied d'un versant relativement pentu et boisé. La rivière est ainsi protégée des influences du soleil jusqu'en début d'après-midi une bonne partie de l'année, ce qui joue sur l'amplitude et le déphasage de la composante journalière.

#### **7.4. Mise en évidence par l'ACI du rôle joué par les arbres de l'espace rivulaire (ripisylve)**

Au-delà des effets induits par le boisement d'un versant boisé, l'ACI permet de révéler le rôle plus général que jouent les arbres de la ripisylve sur le cycle nyctéméral de l'*Odon*. En effet, la structure des composantes CO2 et CO2a révèle que le signal circadien de la rivière n'est pas simplement influencé par les facteurs climatiques, contrairement à celui de la *Sélune*, mais est aussi soumis à un facteur de contrôle pondérant l'effet de ces derniers une partie de l'année. L'amplitude du cycle s'accroît effectivement de janvier en avril, conformément à l'intensification du rayonnement solaire, à l'image de celui de la *Sélune*, mais commence à décliner environ 2 mois avant le début de l'été, période où l'énergie reçue par la rivière devrait être à son maximum durant le jour. Seul le développement progressif du feuillage des arbres de la ripisylve semble devoir expliquer ce déclin précoce. Leur canopée porte une ombre qui s'intensifie au fur et à mesure que les arbres débourent et que les feuilles croissent, ce qui intervient de mars à mi-mai en Normandie. La décroissance de l'amplitude du signal journalier à partir de l'été est lié, comme pour la *Sélune*, à la diminution de l'intensité des facteurs climatiques (durée du jour, intensité du rayonnement solaire). Le filtre de la ripisylve contribue à abaisser la température de l'*Odon* amont de plusieurs degrés en début d'été.

#### **7.5. L'ACI et l'influence du barrage de Vezins.**

Deux composantes (CS2 et CS2a) présentent des signaux qui sont liés selon nous à la présence du lac de retenue du barrage de Vezins, aux variations de régime hydraulique du cours d'eau pour la

production d'hydro-électricité par EDF et au démantèlement de l'infrastructure en 2019.

L'ACI a regroupé l'ensemble de ces impacts en composante CS2a, la composante CS2 étant une synthèse entre les effets du barrage et ceux induits par les variations journalières du climat.

La production d'hydro-électricité par éclusées détermine la présence d'alternances entre des périodes durant lesquelles l'eau est turbinée et relâchée dans la *Sélune*, et des périodes pendant lesquelles la charge hydraulique doit être reconstituée. Si le débit de la *Sélune* amont est faible, la reconstitution de la charge hydraulique prend du temps. Pendant ces périodes, EDF est tenu de relâcher une partie du débit entrant (débit dit réservé) mais ce débit est insuffisant pour que la sonde Se2 reste en eau. Elle mesure alors la température de l'air (annexe 11). Pendant les périodes de crue, qui surviennent préférentiellement en hiver, le débit entrant peut être suffisant pour qu'EDF n'ait pas nécessité de remplir le réservoir par éclusées (annexe 9). Durant ces périodes, une grande partie du débit entrant est alors relâchée et la sonde Se2 reste émergée. De tels événements se sont déroulés en début d'années 2014, 2015 et 2016 (annexe 8). L'ACI les a regroupés en composante CS2a avec l'ensemble des variations thermiques générées par les éclusées. En fin de série, CS2a enregistre également les mouvements d'eau préparatoires à l'arasement du barrage de *Veziens* et qui se sont révélés nécessaires à la gestion de sédiments pollués.

La composante CS2a porte également un signal saisonnier qui s'est interrompu au moment de la destruction du barrage et que nous interprétons comme étant induit par le lac de *Veziens*. Situé en amont du barrage, ce dernier s'étendait sur environ 200 ha. Il présentait une large surface exposée aux agents atmosphériques, permettant d'emmagasiner de la chaleur du printemps en automne et contribuant ainsi au réchauffement de la *Sélune*. Ce réchauffement peut être estimé à 3°C au maximum en juillet. En hiver, la présence de la retenue semble avoir eu un impact plus

limité bien que le plan d'eau ait contribué à écrêter et déphaser certains événements thermiques (annexe 11).

Enfin, les effets de l'arasement du barrage sont également attribués par l'ACI à la composante CS2a. Le principal effet de la disparition de l'infrastructure est l'enfouissement de la sonde Se2 sous plusieurs dizaines de sédiments. À partir de 2019, cette sonde mesure la température d'un milieu confiné qui pondère les variations thermiques de l'atmosphère de quelques degrés en été et d'environ 1,5 °C en hiver. Cette composante saisonnière dispose d'une structure très différente en termes d'amplitude et de phase par rapport à celle que nous interprétons comme ayant été induite par le lac de *Veziins*.

## **7.6. L'importance de la structure du réseau de mesure**

L'ACI a permis de mettre en évidence un contrôle par une douzaine de facteurs naturels ou non des régimes thermiques de l'Odon et de la *Sélune*. Elle a montré par ailleurs l'évolution amont/aval des effets de certains d'entre eux. Cette performance est imputable à la méthode elle-même mais aussi à l'architecture du réseau de mesure qui, contrairement aux réseaux patrimoniaux classiques, a privilégié le suivi d'un nombre restreint de cours d'eau mais avec une densité de stations supérieure. Idéalement, il aurait convenu de disposer de 5 sites de suivi sur l'Odon, afin de mettre en évidence le rôle des eaux souterraines et la distance à la mer sur son régime thermique. Pour la *Sélune*, 3 stations complémentaires seraient nécessaires pour analyser d'une part son contexte estuarien (1 station), d'autre part son bassin amont (2 stations) qui comporte deux grands types d'aquifères.

## **7.7. Un prolongement possible de notre étude avec une Analyse en Facteurs Indépendants (AFI)**

L'ACI décompose linéairement le signal avec l'hypothèse d'absence de bruit. La qualité de la décomposition et de la séparation peuvent ainsi être affectées dans le cas de données fortement bruitées. La densité marginale des sources dans une ACI est souvent soit fixée, soit sélectionnée parmi une famille limitée de densités, ce qui peut se traduire par une perte en flexibilité. Pour pallier ces deux aspects, il serait intéressant de mener une analyse en facteurs indépendants (Attias[39]) qui propose un modèle génératif avec bruit et dans lequel les densités marginales des sources sont modélisés avec des mélanges gaussiens, ayant ainsi la capacité de pouvoir approcher des densités arbitraires. Pour le cas spécifique de notre application impliquant des données temporelles, il serait intéressant de considérer un modèle AFI avec des sources temporellement structurées (Attias[40]).

## Bibliographie

- [1] Magnuson, J.J., Crowder, L.B. & Medvick, P. A. 1979. Temperature as an ecological resource. *Am Zool*, 19, 331-343.
- [2] Ebersole, J.L., Liss, W.J. & Frissell, C.A. 2001 Relationship between stream temperature, thermal refugia and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* abundance in arid-land streams in the northwestern United States. *Ecology of Freshwater Fish*, 10, 1–10.
- [3] Daufresne, M., Boët, P. (2007) Climate change impacts on structure and diversity of fish communities in rivers. *Global Change Biology*, 13, 2467-2478
- [4] Caissie, D. 2006. The thermal regime of rivers : A review. *Freshwater Biology*, 51,1389–1406.
- [5] Comte, L., Buisson, L., Daufresne, M. & Grenouillet, G. 2013. Climate-induced changes in the distribution of freshwater fish : observed and predicted trends. *Freshwater Biology*, 58, 625-639.

[6] Wieser, W., Frostner, H., Schiemer, F. & Mark, W. 1988. Growth Rates and Growth Efficiencies in Larvae and Juveniles of *Rutilus rutilus* and Other Cyprinid Species : Effects of Temperature and Food in the Laboratory and in the Field. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 45, 6, 943-950, <https://doi.org/10.1139/f88-116>

[7] Wolter, C. 2007. Temperature influence on the fish assemblage structure in a large lowland river, the lower Oder River, Germany. Ecol. Freshwater Fish., 16, 493–503.

[8] De Vlaming, V.L. 1972. Environmental control of teleost reproductive cycles : a brief review. J. Fish Biol., 4, 131–140.

[9] Souchon, Y. & Tissot, L. 2012. Synthesis of Thermal Tolerances of the Common Freshwater Fish Species in Large Western Europe Rivers. Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems, EDP sciences/ONEMA, 405 (3), 48 p, ff10.1051/kmae/2012008ff. fffal-00783683ff

[10] Whitehead, P.G., Wilby, R., Battarbee, R.W., Kernan, M. & Wade, A.J., 2009. A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. Hydrological Sciences-Journal- des Sciences Hydrologiques, 54 (1), 101-123.

[11] Moatar, F. & Gailhard, J. 2006. Water temperature behaviour in the River Loire since 1976 and 1881. C. R. Geoscience, 338, 319-328

[12] Poirel, A., Lauters, F. & Desaint, B. 2008. 1977-2006 : Trente années de mesures des températures de l'eau dans le Bassin du Rhône. 1977-2006 : Thirty years of water temperature measurements in the Rhône Basin. Hydroécol. Appl., 16, 91–213.



- [13] Larnier, K., Roux, H., Dartus, D & Croze, O. 2010. Water temperature modeling in the Garonne River (France). *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, 398, 04.
- [14] Webb, B.W. & Walling, D.E. 1993. Temporal variability in the impact of river regulation on thermal regime and some biological implications. *Freshwater Biology*, 29, 167-182.
- [15] Poole, G.C. & Berman, C.H. 2001. An ecological perspective on in-stream temperature : natural heat dynamics and mechanisms of human-caused thermal degradation. *Environmental Management*, 27,787-802.
- [16] Webb, B.W., Hannah, D.M., Moore, R.D., Brown, L.E. & Nobilis, F. 2008. Recent advances in stream and river temperature research. *Hydrological Processes*, 22, 902–918.
- [17] Ryan, D., Yearsley, J.M. & Kelly-Quinn, M. 2013. Quantifying the effect of Semi-Natural Riparian Cover on Stream Temperatures : Implications for Salmonid Habitat Management. *Fisheries Management and Ecology*, 1-13.
- [18] Hannah, D.M. & Garner, G. 2015. River water temperature in the United Kingdom : Changes over the 20th century and possible changes over the 21st century. *Progress in Physical Geography*, 39, 1, 68-92.
- [19] Jones, N.E. & Schmidt, B.J. 2018. Thermal regime metrics and quantifying their uncertainty for North American streams. *River Res .Applic.*, 34, 382–393, <https://doi.org/10.1002/rra.3257>
- [20] Sinokrot, B.A. & Stefan, H.G. 1994. Stream water temperature sensitivity to weather and bed parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120, 722-736.

[21] Evans, E.C., McGregor, G.R. & Petts, G.E. 1998. River energy budgets with special reference to river bed processes. *Hydrological Processes*. 12, 4, 575-595.

[22] Lalot, E., Curie, F., Wawrzyniak, V., Baratelli, F., Schomburgk, S., Flipo, N., Piegay, H., & Moatar, F. 2015. Quantification of the contribution of the Beauce groundwater aquifer to the discharge of the Loire River using thermal infrared satellite imaging, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 4479–4492, <https://doi.org/10.5194/hess-19-4479-2015>

[23] Torgersen, C.E., Faux, R.N., McIntosh, B.A., Poage, N.J. & Norton D.J. 2001. Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams. *Remote Sensing of Environment*, 76, 386–398.

[24] Kelleher, C., Wagener, T., Gooseff, M., McGlynn, B., McGuire K. & Marshall L. 2012. Investigating controls on the thermal sensitivity of Pennsylvania streams. *Hydrol. Process.*, 26, 771-785.

[25] Arismendi, I., Safeeq, M., Johnson, S.L., Dunham, J.B. & Haggerty, R. 2013. Increasing synchrony of high temperature and low flow in western North American streams : double trouble for coldwater biota? *Hydrobiologia*, 712, 61–70, <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1327-2>

[26] Ryan, D., Yearsley, J.M. & Kelly-Quinn, M. 2013. Quantifying the effect of Semi-Natural Riparian Cover on Stream Temperatures : Implications for Salmonid Habitat Management. *Fisheries Management and Ecology*, 1-13.

[27] Johnson, M.F., Wilby, R.L. & Toone, J.A. 2014. Inferring air-water temperature relationships from river and catchment properties. *Hydrological Processes*, 28, 2912-2928.

[28] Jackson, F.L., Hannah, D.M., Fryer, R.J., Millar, C.P. & Malcolm, I.A. 2017. Development of spatial regression models for predicting summer river temperatures from landscape characteristics: Implications for land and fisheries management. *Hydrological Processes*, 31, 6, 1225-1238.

[29] Garner, G., Malcolm, I.A., Sadler, P. & Hannah, D.M. 2017. The role of riparian vegetation density, channel orientation and water velocity in determining river temperature dynamics. *Journal of Hydrology*, 553, 471-485.

[30] Dugdale, S.J., Malcolm, I.A., Kantola, K. & Hannah, D.M. 2018. Stream temperature under contrasting riparian forest cover: Understanding thermal dynamics and heat exchange processes. *Science of the Total Environment*, 610-611, 1375-1389.

[31] Beaufort, A., Moatar, F., Sauquet, E., Loicq, P. & Hannah, D.M. 2019. Influence of landscape and hydrological factors on stream–air temperature relationships at regional scale, *Hydrological Processes*, 34, 3, 583-597.

[32] Webb, B.W. & Walling, D.E. 1993. Temporal variability in the impact of river regulation on thermal regime and some biological implications. *Freshwater Biology*, 29, 167-182.

[33] Poirel, A., Gailhard, J. & Capra, H. 2010. Influence des barrages-réservoirs sur la température de l'eau: exemple d'application au bassin versant de l'Ain. *La Houille Blanche*, 4, 72-79.

[34] Seyedhashemi, H., Moatar, F., Vidal, J.-P., Diamond, J.S., Beaufort, A., Chandesris, A. & Valette, L., 2021. Thermal signatures identify the influence of dams and ponds on stream temperature at the regional scale. *Science of the Total Environment*, 766, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142667>

[35] Chandesris, A., Van Looy, K., Diamond, J.S. & Souchon Y. 2019. Small dams alter thermal regimes of downstream water. *Hydrology and Earth System Sciences*, European Geosciences Union, 23, 4509-4525.

[36] Gresselin, F., Dardaillon, B., Bordier, C., Parais, F. & Kauffmann, F., 2021. Use of statistical methods to characterize the influence of groundwater on the thermal regime of rivers in Normandy, France : comparison between the highly permeable, chalk catchment of the Touques River and the low permeability, crystalline rock catchment of the Orne River. *Geological Society of London Special Publications*. DOI: [10.1144/SP517-2020-117](https://doi.org/10.1144/SP517-2020-117)

[37] Hyvärinen A., Oja E., « Independent component analysis : algorithms and applications », *Neural Networks*, 13 (4–5), pp. 411-430, 2000.

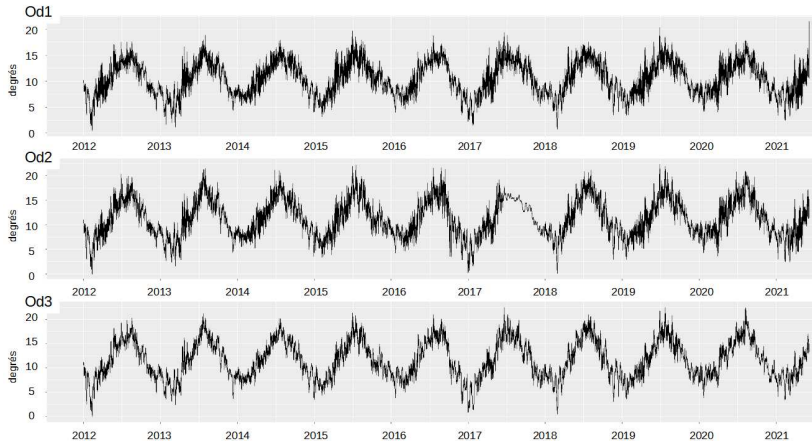
[38] Marchini J., Heaton C., Ripley, D., Maintainer, The fastICA Package – FastICA algorithms to perform ICA and Projection Pursuit, 2003.

[39] Attias H., « Independent Factor Analysis », *Neural Computation*, volume 11, numéro 4, pp. 803-851, 1999.

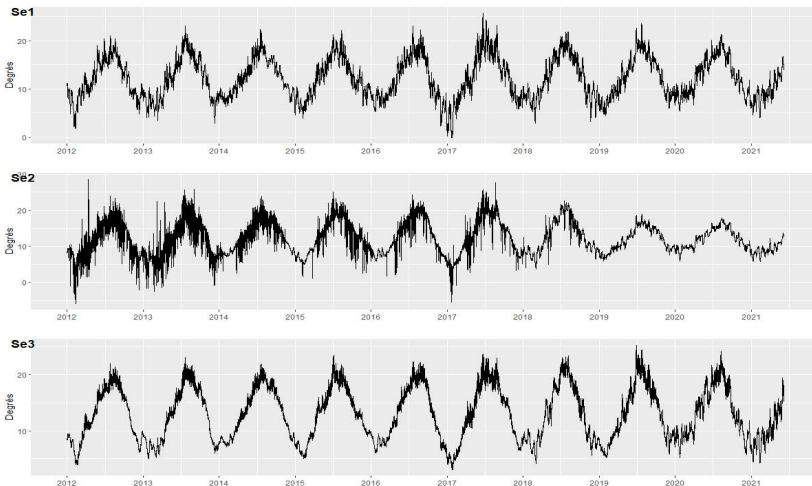
[40] Attias H., «Independent Factor Analysis with Temporally Structured Sources », *Advances in Neural Information Processing Systems*, volume 12, 1999.  
<https://proceedings.neurips.cc/paper/1999/file/6a81681a7af700c6385d36577ebec359-Paper.pdf>

## Annexe 1 : Chroniques de température des stations étudiées

### L'Odon



### La Sélune



## Annexe 2 : Caractéristiques environnementales des sites étudiés

Station	Od1	Od2	Od3	Se1	Se2	Se3
Altitude en m (IGN 69)	202	110	45	60	30	13
Distance à la source en km	3,8	13,6	33,9	41,8	57,5	64,7
Couvert boisé	++++	++++	+++++	+	++	+++
Orientation	SE/ NW	SW/NE	SSW/ NNE	NW/SE	SSE/NNW	NNE/ SSW
Largeur du cours d'eau en mètres	2	2,5	3	20	19 avant l'arasement du barrage	22
Distance au barrage en km	N/A	N/A	N/A	N/A	0,4 aval Vezins N/A après 2019	3,6 aval Roche Qui Boit

### Annexe 3 : Historique des travaux de démantèlement du barrage de Vezins

Les travaux de démantèlement du barrage de Vezins ont eu lieu de 2017 à 2020 selon le déroulé suivant :

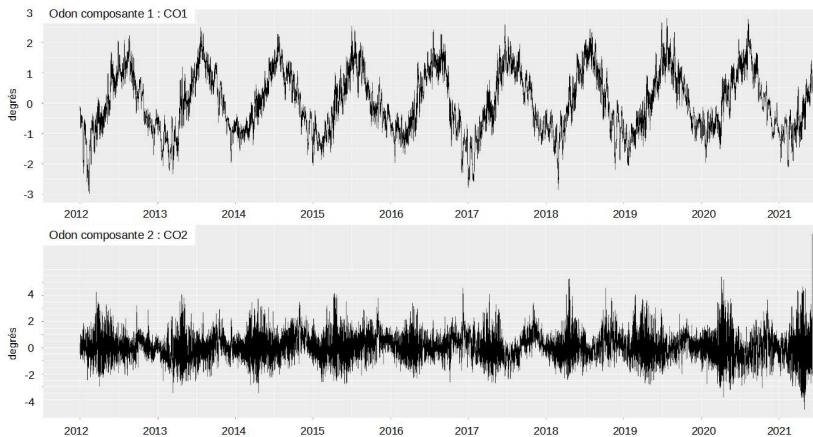
- de juin 2017 à octobre 2017, abaissement progressif de la ligne d'eau dans le plan d'eau amont afin de draguer et gérer des sédiments pollués. La ligne d'eau a été abaissée à 56 mètres à partir du 12 juin 2017, puis 54 mètres en juillet et enfin 52 mètres en octobre ;

- mise à l'arrêt des groupes de production d'électricité le 14 mai 2018 ;

- poursuite de la vidange du 20 août 2018 au 2 septembre 2018. Le barrage a été partiellement remis en eau en novembre 2019 pour une meilleure gestion des crues hivernales avant que les travaux de démantèlement ne débutent en mai 2019.

Annexe 4 : Analyse en deux composantes indépendantes des signaux de l'Odon.

Représentation de la variation de l'amplitude normalisée des composantes extraites en fonction du temps et des valeurs de la matrice de passage pour chacune d'elles

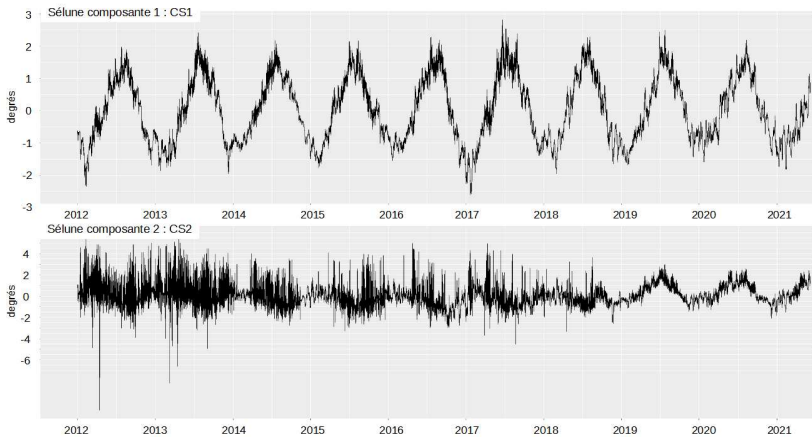


Matrice de passage associée (Odon)	Od1	Od2	Od3
Composante 1 (CO1)	3.1308973	3.7363173	3.9177197
Composante 2 (CO2)	0.6945398	0.5618506	-0.0768006



Annexe 5 : Analyse en deux composantes indépendantes des signaux de la Sélune.

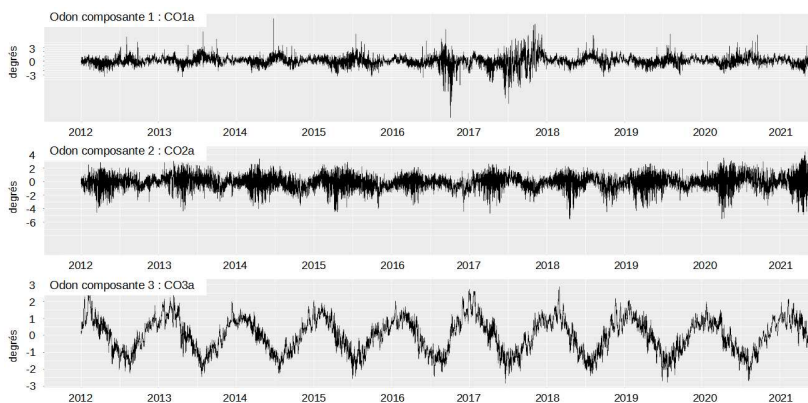
Représentation de la variation de l'amplitude normalisée des composantes extraites en fonction du temps et des valeurs de la matrice de passage pour chacune d'elles



Matrice de passage associée (Sélune)	Se1	Se2	Se3
Composante 1 (CS1)	4.1920234	4.118066	4.63600560
Composante 2 (CS2)	0.3280685	-1.450896	-0.03800744

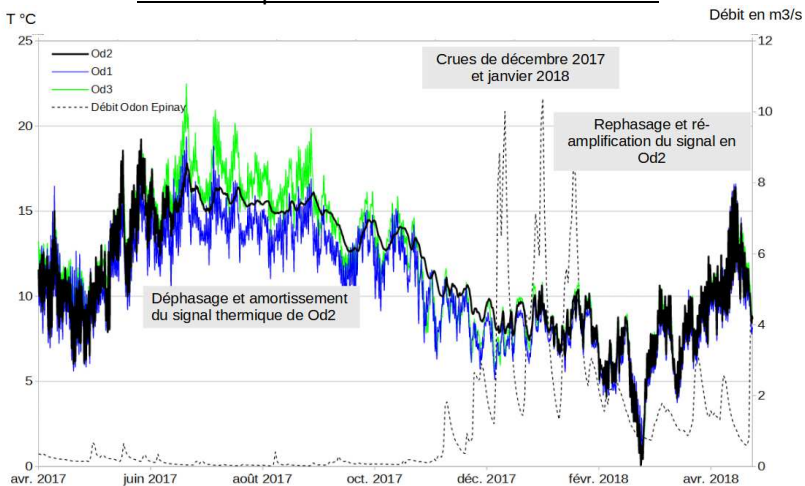
## Annexe 6 : Analyse en trois composantes indépendantes des signaux de l'Odon

Variation de l'amplitude normalisée des composantes extraites en fonction du temps et des valeurs de la matrice de passage pour chacune d'elles



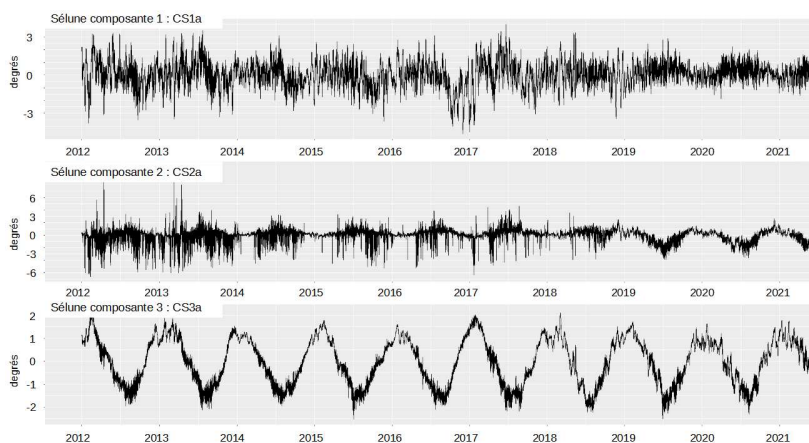
Matrice de passage associée (Odon)	Od1	Od2	Od3
Composante 1 (CO1a)	-0.07246316	0.5225049	0.02287393
Composante 2 (CO2a)	-0.65836579	-0.4285632	0.14792459
Composante 3 (CO3a)	-3.14984287	-3.7317214	-3.91669772

## Annexe 7 : Interprétation d'une des anomalies thermiques détectées par l'ACI dans les séries de l'Odon



## Annexe 8 : Analyse en trois composantes indépendantes des signaux de la Sélune

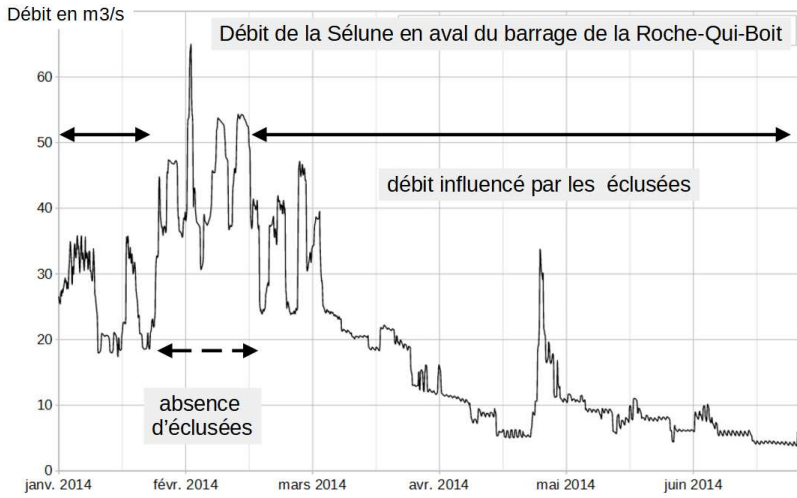
de la variation de l'amplitude normalisée des composantes extraites en fonction du temps et des valeurs de la matrice de passage pour chacune d'elles



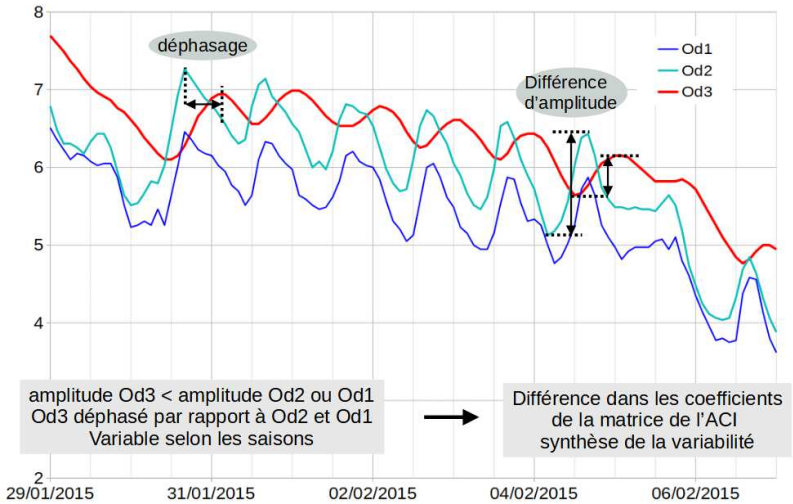
Matrice de passage associée (Sélune)	Se1	Se2	Se3
Composante 1 (CS1a)	1.5278391	0.1902942	0.4354890
Composante 2 (CS2a)	0.2050668	1.4440125	-0.1504116
Composante 3 (CS3a)	-3.9536368	-4.1186846	-4.6583451

## Annexe 9 : Chronique de débit de la Sélune

Station de Saint-Aubin-de-Terregatte, en aval du barrage de la Roche-Qui-Boit (source DREAL), mettant en évidence l'absence d'éclusées en période de fort débit comme en février 2014



Annexe 10 : Différence de signature thermique du cycle nyctéméral de l'Odon Od3 par rapport à celui des stations amonts Od1 et Od2



## Annexe 11 : Influence des éclusées sur la température

Température mesurée en Se2 au pied du barrage de Vezins et impact du barrage sur le cycle thermique de la Sélune (modification de phase et d'amplitude)

