



HAL
open science

Analyse de stationnarité des étiages dans le bassin Adour-Garonne

Louis Héraut, Eric Sauquet, Valentin Mansanarez

► **To cite this version:**

Louis Héraut, Eric Sauquet, Valentin Mansanarez. Analyse de stationnarité des étiages dans le bassin Adour-Garonne. INRAE Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes; Agence de l'eau Adour-Garonne. 2022, pp.1-26. hal-03856262

HAL Id: hal-03856262

<https://hal.inrae.fr/hal-03856262v1>

Submitted on 16 Nov 2022

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

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

Analyse de stationnarité des étiages dans le bassin Adour-Garonne

Louis HÉRAUT, Éric SAUQUET, Valentin MANSANAREZ

RiverLy, INRAE centre Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes

Février 2022



PRÉFET COORDONNATEUR
DU BASSIN ADOUR-GARONNE

Résumé

Cette étude a pour but d'examiner les tendances présentes dans les étiages du bassin Adour-Garonne sur un ensemble de stations hydrométriques aux débits peu influencés par les actions humaines, positionnées principalement en tête de bassin et couvrant presque 10 % du territoire, pour déceler des éventuels impacts du changement climatique sur l'hydrologie de surface. Une variante du test de Mann-Kendall a permis d'analyser la significativité des tendances. Dans la continuité avec des précédentes études de stationnarité, les résultats du test font apparaître des changements sur les débits annuels et estivaux (saison de mai à novembre inclus), même si toutes les stations ne présentent pas une tendance significative. Les réductions des débits examinés ici *QA*, *QMNA* et *VCN10* varient entre -4 et -12% par décennie pour *QA*, entre -3.5 et -23 % par décennie pour *QMNA* et -3.6 et -26.3 % par décennie pour *VCN10*. La dynamique des étiages a évolué avec des étiages plus précoces (entre -10 et -50 jours entre les deux périodes 1968-1988 et 2000-2020, aux stations pour lesquelles le test indique une tendance significative à 10 %). En revanche, la date du centre de l'étiage n'a sensiblement pas évolué.

Table des matières

1	Introduction	4
2	État de l'art	4
3	Données et méthode	6
3.1	Données	7
	Source des données	7
	Critique des données et gestion des données manquantes	7
	Echantillonnage saisonnier pour l'analyse des étiages	8
	Définition des indices	8
3.2	Caractérisation des changements	8
	Test de Mann-Kendall et ses variantes	9
	Pente de Sen	10
	Écarts de moyennes entre deux sous-périodes	10
	Application du test au bassin Adour-Garonne	10
3.3	Supports de restitution	10
	Fiches "station"	11
	Tableaux récapitulatifs	13
	Cartes	16
4	Résultats	18
5	Conclusion	19
6	Bibliographie	20
7	Annexe : Évolution des principales variables climatiques	22

1 Introduction

L'effet du changement climatique sur l'hydrologie doit être examiné conjointement selon deux approches, l'une historique et l'autre prospective. L'approche historique repose sur des tests statistiques appliqués à de longues séries d'observations pour détecter d'éventuelles non-stationnarités. La seconde mobilise une chaîne de modélisation numérique hydro-climatique, avec en entrée des scénarios globaux d'émission de gaz à effet de serre et en sortie des séries temporelles de variables d'intérêt (débits, niveaux piézométriques, etc.), pour les prochaines décennies. Le regard double sur le passé récent et sur le futur permet d'apprécier la cohérence et la continuité entre les tendances identifiées sur les observations et celles sur les données simulées sous changement climatique. La présente étude est une analyse de tendance portant sur les débits observés sur un échantillon choisi de stations hydrométriques du bassin de gestion de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne.

2 État de l'art

De nombreuses études de stationnarité ont été menées pour détecter des changements dans les séries temporelles de variables descriptives du cycle de l'eau. Les rapports du GIEC en font régulièrement la synthèse [IPCC, 2021].

À ce jour, en Europe, il n'y a pas de consensus sur l'évolution des débits annuels ou d'étiage, tant sur le signe de ce changement que sur l'intensité [Stahl et al., 2010; Harrigan et al., 2018]. Cependant, des tendances sont détectées à l'échelle régionale. Ainsi, les résultats de Vicente-Serrano et al. [2019] suggèrent des changements organisés selon un gradient nord-sud (augmentation des débits annuels dans le nord et diminution dans le sud de l'Europe de l'Ouest). Ils confirment la diminution de la ressource superficielle en eau en zone méditerranéenne mise en exergue dans d'autres études nationales ou régionales (ex. Giuntoli et al. 2013, Gudmundsson et al. 2021, Lorenzo-Lacruz et al. 2013, Masseroni et al. 2021). Notons que les conclusions sur les changements (signe et/ou intensité) peuvent diverger en fonction des méthodes appliquées, des données manipulées et des périodes étudiées, en Europe comme ailleurs (cf. Shukla et al. 2015 ; Udall and Overpeck 2017; Mo and Lettenmaier 2018 pour l'Amérique du Nord). Les études de stationnarité appliquées aux niveaux piézométriques sont moins nombreuses car elles se heurtent à la faible disponibilité des observations. C'est le cas en France: les séries répondant aux exigences d'une analyse de stationnarité (notamment de plus de 30 ans) sont quasi inexistantes dans le sud de la France [Baulon et al., 2020]. Des études locales montrent sans surprise que les tendances sur les eaux de surface sont similaires à celles identifiées sur les eaux souterraines en présence d'échanges nappe-rivière actifs (ex. Ribeiro et al. 2015).

La dernière étude de stationnarité régionale intéressant le secteur Adour-Garonne a été réalisée dans le cadre du projet PIRAGUA [Beguiría, 2022]. Le périmètre étudié est la chaîne pyrénéenne sur les versants espagnol, andorrans et français. Des analyses ont porté sur un ensemble de stations hydrométriques sélectionnées pour la longueur des enregistrements, la qualité de la mesure et le caractère peu ou pas influencé des débits mesurés (Figure 1). Côté français, ce sont 36 stations hydrométriques du Réseau de Référence pour la Surveillance des Étiages qui ont été examinées. Les résultats des analyses pour chaque station sont disponibles de manière interactive sur le portail de l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique (OPCC) avec des fiches «station» présentant les résultats du teste de stationnarité. La variante du test de Mann-Kendall de Yue et al. [2002] a été appliquée à un ensemble de variables hydrologiques dont les débits annuels QA, les débits moyens sur 3 jours minimaux (VCN3) sur l'année et sur chacun des douze mois de l'année, et les quantiles des courbes des débits classés annuelles ou mensuelles (notamment, Q10 associé à une fréquence de dépassement de 90% dans l'année ou le mois considéré. Différentes fenêtres temporelles ont été explorées (1950-2019, 1960-2019, 1970-2019, 1980-2019, 1990-2019, et 2000-2019).

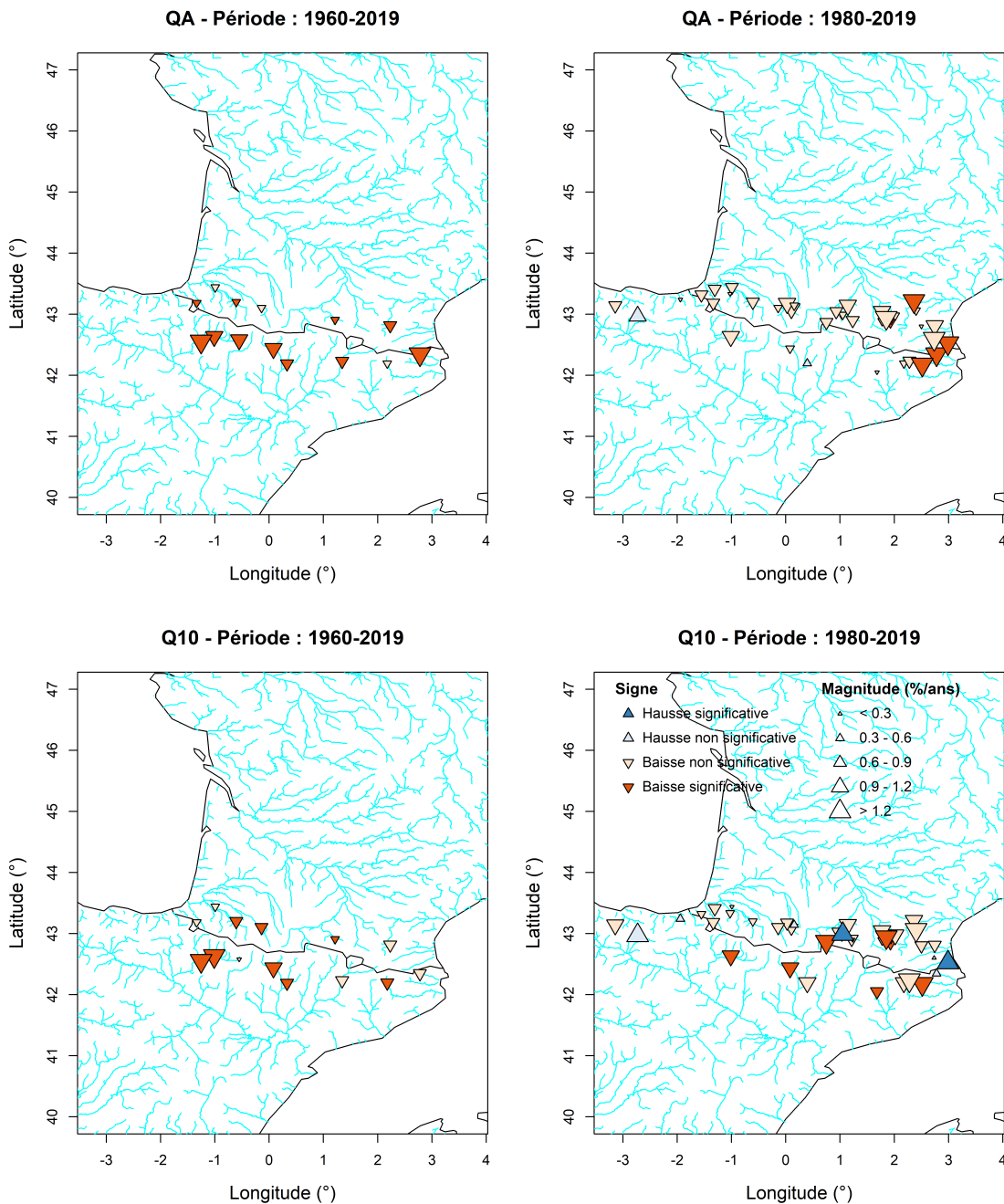


Figure 2. Résultats du test de tendance appliqué au débit annuel QA et au quantile Q10 annuel sur la période 1960-2019 et 1980-2019 (sources : PIRAGUA, OPCC consultés en février 2022).

3 Données et méthode

La démarche globale (Figure 3) fait apparaître l'ensemble du processus depuis l'extraction des données jusqu'à la production des supports qui résument les analyses de stationnarité, en passant par une critique des données. Les paragraphes qui suivent apportent des détails techniques des différentes étapes.

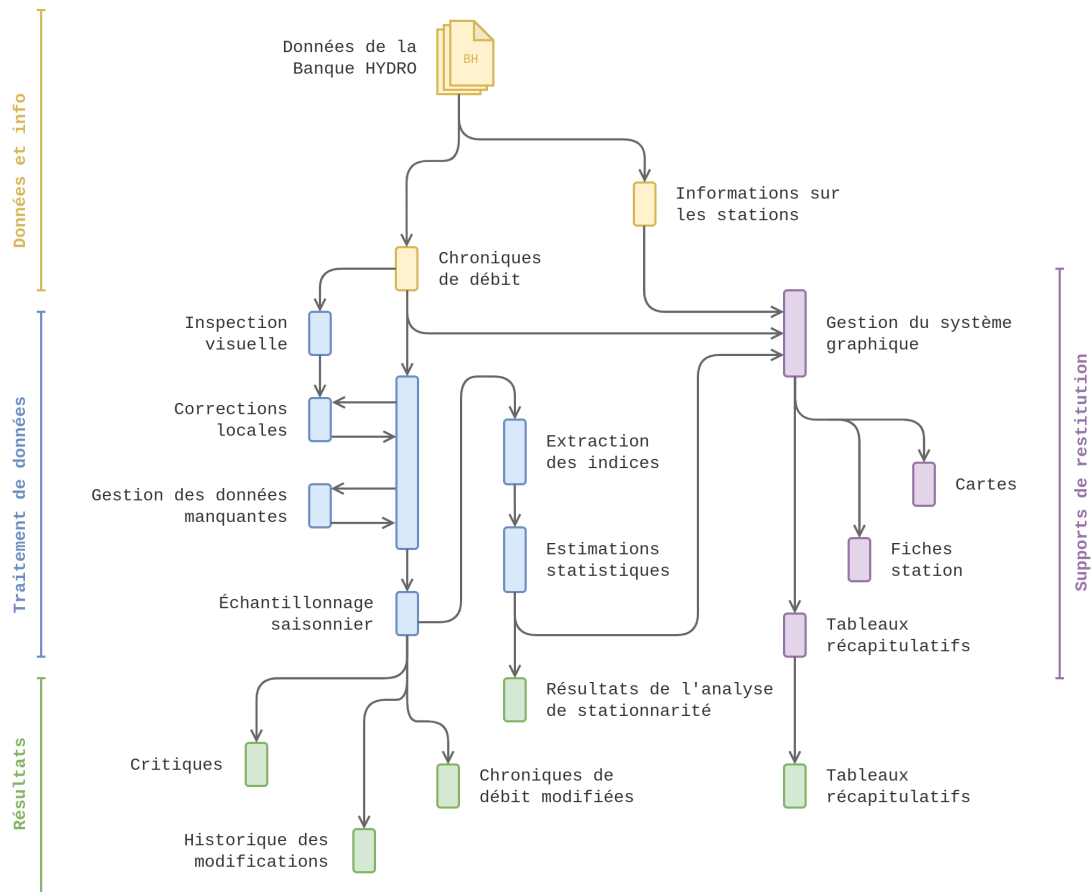


Figure 3. Descriptifs des étapes pour la production des supports de l'analyse de stationnarité. Les flèches indiquent des transferts d'information entre les différentes opérations ou fichiers.

3.1 Données

Source des données

Les variables traitées dans l'analyse de stationnarité sont issues d'un ensemble de séries de débits journaliers, extraites de la banque HYDRO. Le choix de ces séries n'est pas anodin. En effet, si les valeurs de débits présentent des biais causés par des dispositifs de mesure défectueux (ex. une dérive dans le temps des capteurs), il n'est pas impossible d'y détecter une tendance significative. Dans le cas d'un cours d'eau aux débits fortement modifiés par les activités humaines, une augmentation ou diminution progressive des prélèvements dans le bassin versant pourrait être à l'origine de tendances. D'où l'importance d'une bonne qualité de mesure et du caractère peu influencé des débits observés. Ces critères ont prévalu pour la constitution du Réseau de Référence pour la Surveillance des Étiages (RRSE). À l'image du projet PIRAGUA, c'est donc naturellement dans cet ensemble que les stations hydrométriques examinées ici ont été choisies. Une ultime interaction entre les producteurs de données et l'Agence de l'Eau Adour-Garonne [Leurent, communication personnelle] a permis de confirmer la pertinence de la sélection. Parmi les 236 stations hydrométriques de France Métropolitaine du RRSE, 56 ont finalement été retenues, positionnées principalement en tête de bassin versant. Les séries de débit journalier ont une profondeur historique supérieure à 40 ans avec des mesures réputées bonnes par le gestionnaire et un régime hydrologique considéré comme peu altéré par les activités humaines.

Critique des données et gestion des données manquantes

Bien que répondant aux exigences de qualité de mesure, les chroniques de débit ne sont pas exemptes de valeurs aberrantes, des discontinuités dans les enregistrements, etc. qui peuvent perturber le processus d'échantillonnage et les analyses de tendance. Ceci a amené à modifier les données d'origine

extraites de la banque HYDRO :

- Des données sont parfois absentes en continu sur une durée non négligeable. La présence de deux séquences espacées dans le temps interroge sur l'homogénéité du processus d'acquisition des mesures. Si une interruption des enregistrements est constatée sur plus de 10 ans, seule la partie de la chronique la plus récente est conservée,
- Dans le cas où moins de trois jours consécutifs de lacune, les données manquantes sont reconstituées par interpolation linéaire,
- Des valeurs suspectes ont pu être identifiées après examen visuel des chroniques. La comparaison avec des données d'une station hydrométrique voisine sur la période incriminée permet de conclure quant à leur statut. Des estimations ont été proposées en lieu et place des données incohérentes, quand cela était possible. Dans le cas contraire, elles sont devenues des lacunes.

Les résultats de cette critique des données et les corrections apportées aux séries ont été consignés dans différents fichiers au format texte et fournis avec ce rapport. Dans le cadre d'une future actualisation de l'étude, d'autres méthodes pour la critique des données ou d'autres modalités de gestion des lacunes pourront être mises en oeuvre.

Echantillonnage saisonnier pour l'analyse des étiages

Les cours d'eau connaissent des étiages en hiver, notamment dans la partie pyrénéenne. La volonté a été de traiter uniquement les étiages estivaux. Par conséquent, un échantillonnage saisonnier pour certains indices est réalisé de sorte à ne sélectionner que les données du 1^{er} mai au 30 novembre de chaque année. Une année sera considérée en lacune si elle comporte plus de trois jours de lacune sur la période d'échantillonnage.

Définition des indices

La période de basses eaux (l'étiage) est en premier lieu appréciée par son intensité, c'est-à-dire les valeurs des débits constatés. D'autres aspects permettent de caractériser l'étiage : par exemple, la temporalité de l'étiage et sa dynamique. Il n'existe pas une manière unique de décrire l'intensité et la saisonnalité. Le nombre et le choix des indices examinés ont été effectués en concertation avec le Conseil Scientifique du Comité de Bassin Adour-Garonne. Cinq indices hydrologiques ont été retenus et scindés en deux catégories. Trois indices de sévérité décrivent la ressource disponible :

- *QA* : Moyenne des débits journaliers sur l'année hydrologique (du 1^{er} septembre au 31 août),
- *QMNA* : Minimum parmi les débits mensuels de la saison de l'année considérée,
- *VCN10* : Minimum de la moyenne sur dix jours du débit journalier sur la période d'échantillonnage.

Le débit annuel *QA* caractérise la ressource en eau y compris en hautes eaux tandis que les débits *QMNA* et *VCN10* permettent de décrire la dynamique des basses eaux et la capacité du bassin versant à soutenir naturellement les étiages. Deux indices de saisonnalité décrivent la temporalité de l'étiage :

- *tDEB* : Date du début d'étiage, cet indice est associé au jour de la saison de la première moyenne sur dix jours (*VC10*) sous le maximum des *VCN10*,
- *tCEN* : Date du centre d'étiage, cet indice est associé au jour de l'année du *VCN10*, c'est-à-dire le jour où le débit moyen sur dix jours est minimal.

Le début de l'étiage a été privilégié au détriment de la fin de l'étiage pour son lien avec le début des périodes de restriction. Les indices *QMNA*, *VCN10*, *tDEB* et *tCEN* sont soumis à l'échantillonnage saisonnier.

3.2 Caractérisation des changements

Dans la suite, on note $(X_i)_{i=1,\dots,n}$ la série des valeurs de l'indice à tester pour une station hydrométrique donnée.

Test de Mann-Kendall et ses variantes

Le test statistique de Mann-Kendall [Mann, 1945; Kendall, 1975] est un test statistique non paramétrique permettant la détection de tendance. Ce test est assez robuste car aucune hypothèse sur la distribution des données n'est effectuée. L'unique hypothèse effectuée est l'indépendance des données.

On teste l'hypothèse nulle H_0 : "la série est stationnaire" contre l'hypothèse alternative H_1 : "la série présente une tendance" avec un risque d'erreur α . Le paramètre α est le risque d'erreur de première espèce : il représente le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 lorsque celle-ci est vraie.

La statistique de test Z de Mann-Kendall est calculée de la façon suivante :

$$Z = \begin{cases} (S - 1)\sqrt{Var(S)} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ (S + 1)\sqrt{Var(S)} & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (1)$$

où la variable S indique une tendance à la hausse ou à la baisse suivant que S soit positif ou négatif respectivement et $Var(S)$ est la variance de S . S est égale à :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{signe}(X_j - X_i) \quad (2)$$

$$Var(S) = n(n-1)(2n+5)/18$$

Différentes variantes du test ont été proposées pour s'adapter aux spécificités des échantillons $(X_i)_{i=1,\dots,n}$. Ainsi la version du test de Mann-Kendall appliquée ici prend en compte l'existence de valeurs ex-aequo dans la série des $(X_i)_{i=1,\dots,n}$. La variance de S , $Var(S)$, est alors remplacée dans l'équation (1) par :

$$Var(S) = \left(n(n-1)(2n+5) - \sum_{k=1}^n t_k k(k-1)(2k+5) \right) / 18 \quad (3)$$

où t_k est le nombre de valeurs conduisant à k ex aequo. Une autre version [Hamed and Rao, 1998; Hamed, 2008] permet de prendre en compte d'éventuelles auto-corrélations dans les séries $(X_i)_{i=1,\dots,n}$. En effet, lorsque la série est auto-corrélée l'hypothèse d'indépendance des données n'est plus valable et le test va être fortement biaisé : un grand nombre de tendances seront détectées à tort. La modification du test s'effectue au niveau du calcul de la variance par la prise en compte d'un facteur correctif γ tel que :

$$Var_{\rho}(S) = \gamma Var_{\rho=0}(S) \quad (4)$$

$$\gamma = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{k=1}^{n-1} (n-k)(n-k-1)(n-k-2)\rho_k$$

où l'auto-corrélation d'ordre k , ρ_k , est calculée sous hypothèse d'un processus auto-régressif d'ordre 1, i.e. $\rho_k = \rho_1^k$.

Pour une taille d'échantillon suffisamment grande ($n > 10$), la statistique de test Z de Mann-Kendall suit approximativement la loi normale standard, de sorte que l'hypothèse nulle H_0 est rejetée lorsque :

$$|Z| > z_{1-\alpha/2} \quad (5)$$

où $z_{1-\alpha/2}$ est le quantile de la loi normale standard de probabilité au dépassement $1-\alpha/2$.

Pente de Sen

Le test de Mann-Kendall suggère la présence ou non d'une tendance systématique mais ne quantifie pas l'intensité des changements. Un ordre de grandeur du changement est donné par l'estimateur de pente de Sen. Par définition, l'estimateur de pente de Sen d'un ensemble de couple de points $(X_i, Y_i)_{i=1, \dots, n}$ est la médiane des pentes $(X_i - X_j)/(Y_i - Y_j)$ calculées pour toutes les paires de points. Dans le contexte d'une analyse de tendance, la pente de Sen est la médiane des pentes $(X_i - X_j)/(t_i - t_j)$ où $(t_i)_{i=1, \dots, n}$ désignent les dates associées aux $(X_i)_{i=1, \dots, n}$.

Écarts de moyennes entre deux sous-périodes

Les moyennes sur deux sous-périodes et leur différence ont été calculées indépendamment des résultats du test de Mann-Kendall.

Le choix des deux sous-périodes répond à différentes contraintes. La première période doit représenter une période peu marquée par l'impact du changement climatique et la seconde refléter les conditions hydrologiques les plus récentes. L'année 1968 a été choisie comme date de référence pour la sélection des stations du RRSE [Giuntoli and Renard, 2010] ; elle marque le début de la première période. La fin de cette première période repose sur des considérations climatiques et hydrologiques. Ainsi, l'année 1988 apparaît comme une date de rupture dans les séries de température de l'air en Bourgaogne [Richard et al., 2014]. Sur le secteur Adour-Garonne, l'application du test de Pettitt aux cinq indices suggère une majorité de ruptures vers la fin des années 80 pour les débits QA, QMNA et VCN10. Par conséquent, l'année 1988 est définie comme la fin de la première période. Pour permettre une comparaison des moyennes sur les deux sous-périodes, la durée de la seconde période doit être identique à celle de la première 1968-1988. La seconde période correspond à la fenêtre 2000-2020.

Application du test au bassin Adour-Garonne

Le test de Mann-Kendall modifié pour la prise en compte de l'auto-corrélation est appliqué à l'identique à tous les indices. L'usage de cette variante se justifie d'un point de vue hydrologique : les caractéristiques de l'étiage d'une année sont en effet partiellement dépendants du climat et de l'hydrologie de l'année précédente du fait de l'inertie des nappes qui contribuent aux débits estivaux. Seule l'auto-corrélation d'ordre 1 a été considérée ($k=1$ dans l'équation (4)).

Chaque station hydrométrique a fait l'objet de deux applications du test de Mann-Kendall modifié : sur la totalité des données disponibles et sur une période commune 1968-2020. L'hétérogénéité des périodes de suivi influence l'appréciation des tendances. Les résultats sur la période commune seront privilégiés dans les représentations cartographiques, car ils permettent une comparaison des réponses hydrologiques des bassins versants soumis à une même séquence de climat.

Le risque de première espèce α est fixé à 10 %. C'est un choix forcément subjectif. Plus la valeur de α est faible, moins il y aura de non stationnarités détectées et plus la probabilité de faire une erreur en rejetant l'hypothèse de stationnarité est faible. Pour ce type d'analyse, des valeurs entre 1 % et 10 % sont souvent rencontrées dans la littérature.

L'analyse de stationnarité est effectuée avec des outils codés en langage R. L'implémentation préalable du test de Mann-Kendall et ses variantes a été réalisée par V. Mansanarez dans le package R [Statistical Analysis of Trends](#) destiné à être partagé à terme sur le site [The Comprehensive R Archive Network](#).

3.3 Supports de restitution

Les informations fournies se doivent d'être concises et les plus intelligibles possibles pour un(e) non-spécialiste. Trois types de support sont proposés : des fiches "station", des tableaux et des cartes.

Fiches "station"

Les fiches "station" sont des représentations propres à chaque station hydrométrique. Elles sont scindées en trois parties : l'en-tête, la chronique de débits journaliers et les résultats des analyses appliquées à chaque indice. Pour détailler d'avantage cette structure, la fiche de la station hydrométrique O3035210 - Le Briançon aux Bondons [Cocures] est prise pour exemple en Figure 4.

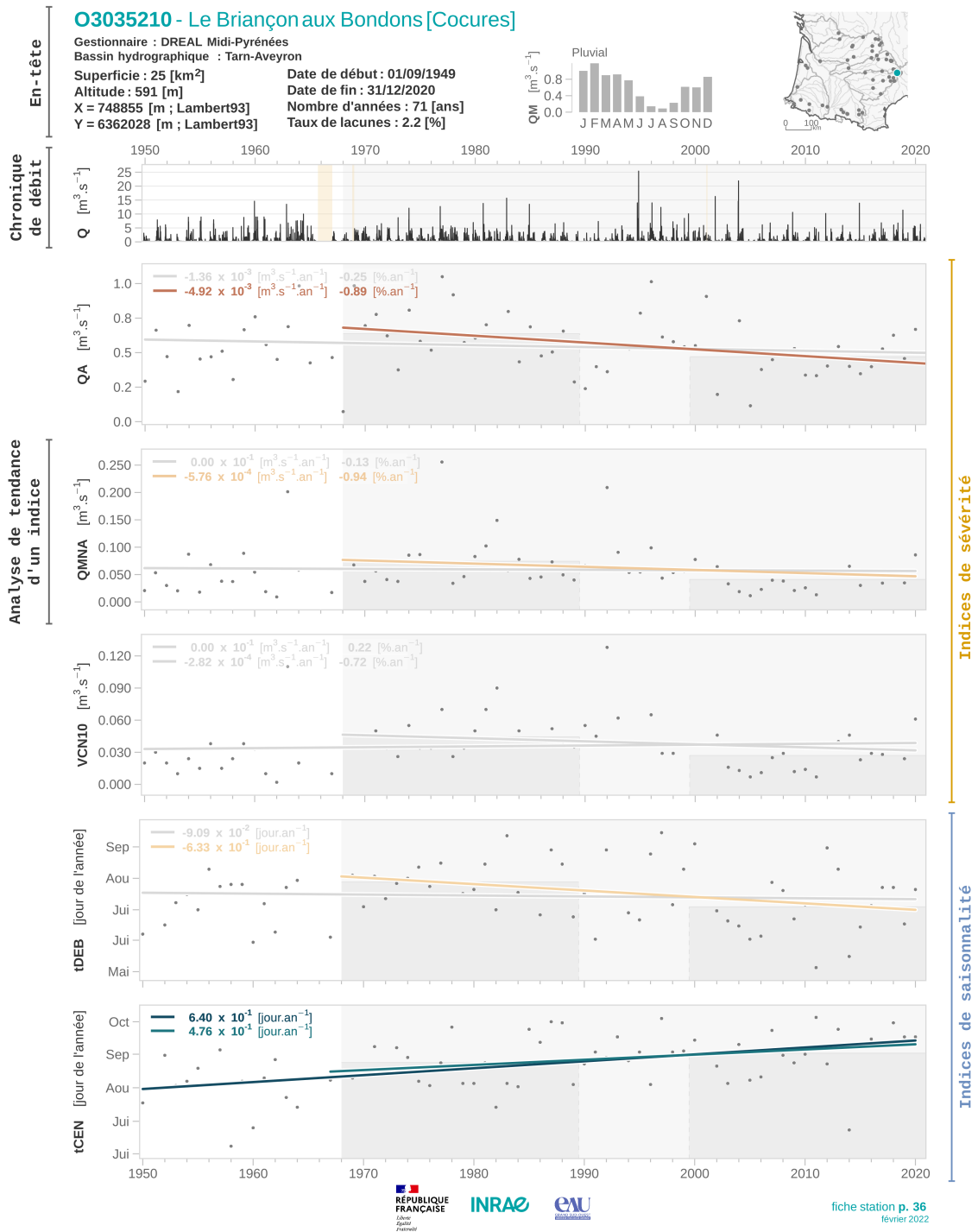


Figure 4. Fiche de la station O3035210 - Le Briançon aux Bondons [Cocures].

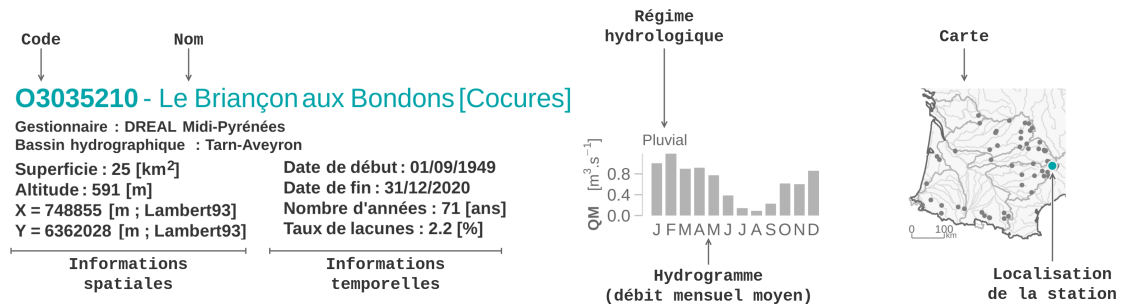


Figure 5. En-tête d'une fiche "station".

L'en-tête (Figure 5) regroupe des informations générales sur la station hydrométrique, extraites des méta-données de la banque HYDRO. Le titre fournit le [code Sandre](#) de la station hydrométrique et son nom (la rivière et le lieu d'implantation de la station). En dessous, sont indiqués le nom du gestionnaire et le bassin hydrographique. Les informations sont organisées en deux colonnes. La première colonne contient :

- La superficie en kilomètre carré du bassin versant,
 - L'altitude en mètre,
 - Les coordonnées en mètre dans le système de projection Lambert93,
- et la seconde colonne :

- La date de début et de fin de la chronique (notons que la fin de la chronique est toute relative pour des stations hydrométriques toujours en activité, car la date de fin indiquée est conditionnée par la date d'extraction de la banque HYDRO (avril 2021)),
- Le nombre d'années de mesure,
- Le taux de lacune en pourcent entre la date de début et la date de fin.

Accolé à cette zone d'information, l'hydrogramme des douze débits mensuels moyens est présenté avec la classe de régime associé [Sauquet et al. \[2008\]](#). Enfin, la carte placée dans la partie droite de cette en-tête permet de situer la station hydrométrique (point de couleur turquoise) dans l'ensemble examiné (point en gris).

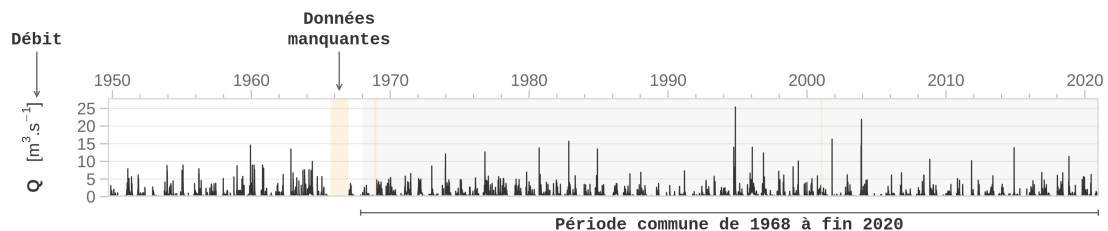


Figure 6. Chronique des débits d'une fiche "station".

La chronique (Figure 6) est celle des débits journaliers mesurés en fonction du temps. Le graphique permet de repérer les périodes de lacune sur fond de couleur sable. Un fond de couleur gris met en évidence la période d'analyse commune 1968-2020.

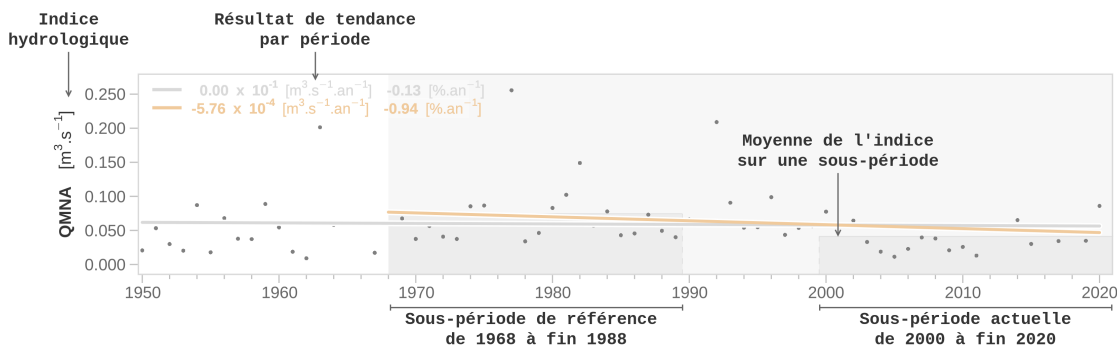


Figure 7. Graphique de l'analyse de tendance du QMNA d'une fiche station.

Les graphiques récapitulatifs de l'analyse de stationnarité pour les cinq indices *QA*, *QMNA*, *VCN10*, *tDEB* et *tCEN* sont alignés pour examiner l'éventuelle concomitance des changements. Un exemple est donné en Figure 7 pour le débit *QMNA*. Le graphique présente l'évolution temporelle de l'indice et les résultats des analyses de tendance effectuées sur les deux périodes différentes. Deux droites – une relative à la totalité de la chronique et la seconde à la période commune 1968-2020 – sont tracées : les pentes sont données par l'estimateur de Sen et les droites passent par la moyenne de l'échantillon placée au milieu de la période considérée. Lorsque la tendance n'est pas significative au risque 10 %, la droite est tracée en gris clair. Dans le cas contraire, une couleur est attribuée à la droite. Cette couleur est choisie dans une échelle de couleur divergente centrée en zéro définie par indice. Les bornes hautes et basses sont fixées par le maximum en valeur absolue des pentes de Sen calculées pour l'indice, sur l'ensemble des périodes et des stations hydrométriques (Figure 8). Les valeurs en haut à gauche des graphiques sont les pentes de Sen exprimées en mètre cube par seconde par an, et en pourcentage de la moyenne de l'indice sur la période, par an. La première ligne correspond à l'analyse sur la période entière et la seconde ligne à l'analyse sur la période commune. Enfin, les moyennes des indices sur les deux sous-périodes 1968-1988 et 2000-2020 sont indiquées par les deux rectangles en gris foncé.

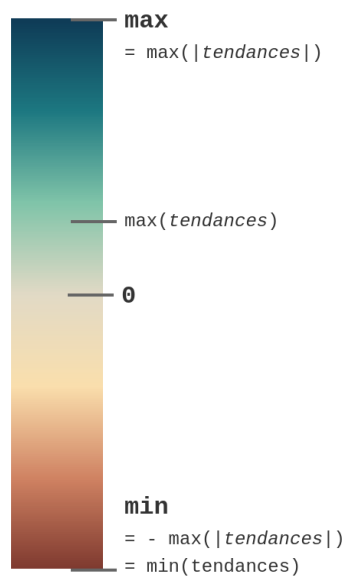


Figure 8. Palette et système de choix des couleurs utilisés.

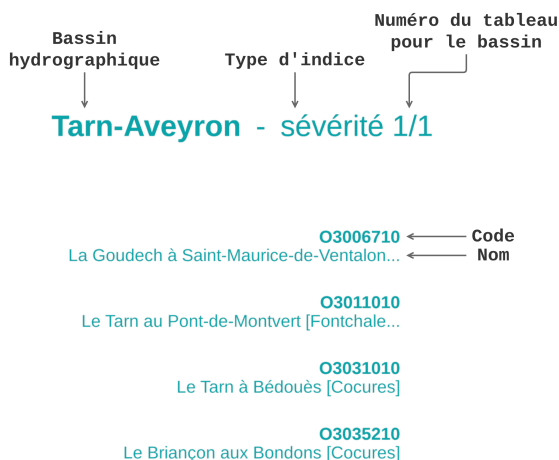
Tableaux récapitulatifs

Les résultats des analyses aux 56 stations ont été rassemblés dans des tableaux pour visualiser de manière directe l'ensemble des résultats et comparer les évolutions entre stations hydrométriques. Les deux catégories d'indice hydrologique font l'objet de deux tableaux. De même, les stations hydrométriques sont regroupées par bassin hydrographique : Adour, Charente, Dordogne, Fleuves-Côtiers, Garonne, Lot et Tarn-Aveyron. Quatre parties distinctes sont visibles (Figure 9) : la zone d'information sur les stations hydrométriques, les résultats des analyses sur la totalité de la période et la période commune 1968-2020, et l'examen des différences entre moyennes des indices calculées par sous-période.

Information sur les stations	Analyse de tendance sur la période maximale accessible				Analyse de tendance sur la période commune				Analyse de tendance sur la période commune				Différence entre les moyennes sur périodes de 20 ans									
	Début Fin	QA [m ³ s ⁻¹]	QMNA [m ³ s ⁻¹]	VCN10 [m ³ s ⁻¹]	QA [m ³ s ⁻¹]	QMNA [m ³ s ⁻¹]	VCN10 [m ³ s ⁻¹]	QA [m ³ s ⁻¹]	QMNA [m ³ s ⁻¹]	VCN10 [m ³ s ⁻¹]	Début Fin	QA [m ³ s ⁻¹]	QMNA [m ³ s ⁻¹]	VCN10 [m ³ s ⁻¹]	dQA [m ³ s ⁻¹]	dQMNA [m ³ s ⁻¹]	dVCN10 [m ³ s ⁻¹]					
																		1949 2020	1961 2020	1949 2020	1961 2020	1968 1988
O3006710 La Goudéch à Saint-Maurice-de-Ventadour...	1949 2020	0.5	0.037	0.018	-0.41	-1.2	-1.6	0.49	0.037	0.017	-0.81	-2.3	0.58	0.057	0.03	2000 2020	0.39	0.015	0.005	-34	-73	-83
O3011010 Le Tam au Pont-de-Montvert [Fontchiale...]	1948 2020	3.2	0.25	0.15	0.013	-0.2	-0.33	3.3	0.27	0.15	-0.43	-0.71	3.9	0.31	0.14	2000 2020	2.8	0.19	0.12	-28	-36	-20
O3031010 Le Tam à Bédoués [Cocures]	1961 2020	6.6	0.85	0.52	-0.21	-1.1	-0.88	6.6	0.85	0.52	-0.36	-1.5	7.5	1.1	0.68	2000 2020	6	0.61	0.38	-20	-46	-44
O3035210 Le Briançon aux Bondons [Cocures]	1949 2020	0.55	0.059	0.036	-0.25	-0.13	0.22	0.55	0.062	0.039	-0.89	-0.94	0.64	0.074	0.044	2000 2020	0.47	0.041	0.027	-26	-45	-39
O3121010 Le Tam à Montbrun [Pont de Montbrun]	1961 2017	17	1.7	0.95	-0.62	-0.49	-1.1	17	1.6	0.88	-0.76	-0.57	19	1.9	1.2	2000 2018	13	1.4	0.76	-29	-24	-34
O3141010 Le Tam à Mostuéjoule [La Muze]	1913 2020	31	7.2	5.8	-0.36	-0.35	-0.29	28	6.7	5.5	-0.87	-0.95	34	8	6.5	2000 2020	24	5.3	4.6	-28	-34	-30
O3194010 La Jonte à Meyrueis [aval]	1969 2020	2.1	0.21	0.13	-0.85	-0.75	-1	2.1	0.21	0.13	-0.85	-0.75	2.4	0.24	0.15	2000 2020	1.8	0.18	0.11	-24	-23	-26
O3314010 La Doubrie à Doubries [Le Mazerécent...]	1960 2020	2.2	0.24	0.15	-0.15	0.1	0.11	2.2	0.25	0.16	-0.29	-0.4	2.4	0.29	0.18	2000 2020	2	0.21	0.14	-14	-26	-20
O3364010 La Doubrie à Nant [Pont de Gardies]	1962 2017	7.3	1.5	1.3	-0.82	-0.57	-0.48	7	1.5	1.3	-0.82	-0.52	7.6	1.6	1.4	2000 2018	5.6	1.3	1.2	-26	-19	-15
O3454310 La Muze à Montjaux [Saint-Hippolyte]	1968 2020	1.3	0.13	0.068	-0.99	-1.5	-1.9	1.3	0.13	0.068	-0.99	-1.5	1.5	0.17	0.095	2000 2020	1.2	0.097	0.049	-24	-42	-48
O4102510 L'Agout à Fraisse-sur-Agout	1951 2017	1.6	0.16	0.098	-0.39	-0.42	-0.54	1.5	0.15	0.094	-0.45	-0.34	1.6	0.15	0.1	2000 2018	1.3	0.14	0.082	-17	-6.7	-18
O4704030 Le Dardou à Paulinet [Saint-Jean-de-Jea...]	1968 2020	1.5	0.11	0.057	-0.76	-1.7	-1.2	1.5	0.11	0.057	-0.76	-1.7	1.7	0.15	0.077	2000 2020	1.3	0.081	0.047	-25	-45	-40
O505010 Le Serre à Coussergues [Resuèrhe]	1968 2020	1	0.16	0.11	-0.73	-0.99	-0.79	1	0.16	0.11	-0.73	-0.99	1.2	0.18	0.13	2000 2020	0.85	0.12	0.09	-30	-34	-30
O5224010 L'Azou à Villefranche-de-Rouergue [ba...]	1942 2020	2.4	0.14	0.057	-0.08	-0.59	-0.81	2.4	0.13	0.05	-1	-1.1	2.8	0.17	0.069	2000 2020	2	0.09	0.029	-29	-47	-58
O5464310 Le Giffour à Saint-Just-sur-Viaur [La F...]	1968 2020	2.1	0.31	0.17	-1.2	-0.68	-0.19	2.1	0.31	0.17	-1.2	-0.68	2.7	0.35	0.2	2000 2020	1.7	0.26	0.15	-39	-24	-24

Figure 9. Tableau récapitulatif pour le bassin hydrographique Tarn-Aveyron.

La zone d'information sur les stations hydrométriques (Figure 10) comprend le bassin hydrographique et le type d'indice. Plusieurs pages peuvent être nécessaires pour un bassin hydrographique, la page consultée est mentionnée. Sous le titre, apparaissent le code et le nom des stations hydrométriques organisés par ordre alphabétique du code.



La partie du tableau placée à droite de la zone d'information présentent les résultats des analyses de stationnarité (Figure 11). Elle fait apparaître deux ensembles de sept colonnes organisés de manière similaire mais se rapportant à la période entière pour les sept premières colonnes puis à la période 1968-2020 pour les sept suivantes. Les dates de début et de fin de disponibilité des données pour la période considérée sont précisées dans la première colonne. Les trois colonnes identifiables par des valeurs dans des cercles gris contiennent les moyennes des indices et les trois dernières colonnes suivantes les résultats des analyses de tendance. Les valeurs des pentes de Sen pour chaque indice sont exprimées en % par an, obtenues en divisant la pente de Sen par la moyenne. Lorsque la tendance n'est pas significative au risque 10 %, la valeur de la pente est en couleur et placée dans un cercle de même couleur. Dans le cas contraire, la valeur de la pente est inscrite en blanc sur un disque de couleur. Le choix de la couleur se fait de la même manière que précédemment, de sorte que la couleur de la droite de la fiche "station" est celle des disques.

Figure 10. Extrait du tableau récapitulatif pour le bassin hydrographique Tarn-Aveyron.

Tarn-Aveyron - sévérité 1/1

	Analyse de tendance sur la série entière							Analyse de tendance sur la période commune						
	Début Fin	\overline{QA} [m ³ .s ⁻¹]	\overline{QMNA} [m ³ .s ⁻¹]	$\overline{VCN10}$ [m ³ .s ⁻¹]	QA [%an ⁻¹]	QMNA [%an ⁻¹]	VCN10 [%an ⁻¹]	Début Fin	\overline{QA} [m ³ .s ⁻¹]	\overline{QMNA} [m ³ .s ⁻¹]	$\overline{VCN10}$ [m ³ .s ⁻¹]	QA [%an ⁻¹]	QMNA [%an ⁻¹]	VCN10 [%an ⁻¹]
O3006710 La Goudech à Saint-Maurice-de-Ventalon...	1949 2020	0.5	0.037	0.018	-0.41	-1.2	-1.6	1968 2020	0.49	0.037	0.017	-0.81	-2.3	-2.6
O3011010 Le Tarn au Pont-de-Montvert [Fontchale...	1948 2020	3.2	0.25	0.15	0.013	-0.2	-0.33	1968 2020	3.3	0.27	0.15	-0.43	-0.71	-0.47
O3031010 Le Tarn à Bédouès [Cocures]	1961 2020	6.6	0.85	0.52	-0.21	-1.1	-0.88	1968 2020	6.6	0.85	0.52	-0.36	-1.5	-1.2
O3035210 Le Briançon aux Bondons [Cocures]	1949 2020	0.55	0.059	0.036	-0.25	-0.13	0.22	1968 2020	0.55	0.062	0.039	-0.89	-0.94	-0.72

Début et fin d'une période d'analyse Moyennes des indices Tendances normalisées par les moyennes des indices Tendance significative à un risque de 10 % Tendance NON significative à un risque de 10 %

Figure 11. Partie du tableau récapitulatif consacrée aux résultats des analyses de tendance.

Tarn-Aveyron - sévérité 1/1

		Différence entre les moyennes sur périodes de 20 ans												
		Moyennes des indices sur la sous-période de référence			Moyennes des indices sur la sous-période actuelle			Différences entre les moyennes normalisées par les moyennes de la période de référence						
		Début	Fin	QA	QMNA	VCN10	Début	Fin	QA	QMNA	VCN10	dQA	dQMNA	dVCN10
				[m ³ .s ⁻¹]	[m ³ .s ⁻¹]	[m ³ .s ⁻¹]			[m ³ .s ⁻¹]	[m ³ .s ⁻¹]	[m ³ .s ⁻¹]	[%]	[%]	[%]
O3006710	La Goudech à Saint-Maurice-de-Ventalon...	1968	1988	0.58	0.057	0.03	2000	2020	0.39	0.015	0.005	-34	-73	-83
O3011010	Le Tarn au Pont-de-Montvert [Fontchale...	1968	1988	3.9	0.31	0.14	2000	2020	2.8	0.19	0.12	-28	-36	-20
O3031010	Le Tarn à Bédouès [Cocures]	1968	1988	7.5	1.1	0.68	2000	2020	6	0.61	0.38	-20	-46	-44
O3035210	Le Briançon aux Bondons [Cocures]	1968	1988	0.64	0.074	0.044	2000	2020	0.47	0.041	0.027	-26	-45	-39

Figure 12. Partie du tableau récapitulatif consacrée aux différences de moyennes des indices entre 1968-1988 et 2000-2020.

La dernière partie du tableau (Figure 12) est dédiée à la comparaison des moyennes sur les deux sous-périodes. Les première et quatrième colonnes indiquent les dates de disponibilité sur les deux périodes considérées. Les colonnes 2 à 4 et 6 à 8 contiennent les moyennes des indices pour chacune des périodes. Les valeurs des différences entre moyennes sont reportées dans les trois dernières colonnes du tableau dans des disques de couleur. Ces valeurs sont données en %, c'est-à-dire en changement relatif par rapport à la moyenne calculée sur la période 1968-1988. Les couleurs sont choisies de la même manière que précédemment. Il faut cependant noter que, comme cette analyse n'est pas issue d'un test statistique à proprement parlé, il n'y a pas de notion de significativité dans le système de coloration du disque.

Cartes

La représentation des résultats sous forme de carte permet d'apprécier l'organisation spatiale des évolutions des étiages à l'échelle régionale. Deux séries de cartes regroupant l'ensemble des indices ont été produites avec la volonté d'une lecture autonome. Toutes les cartes présentent un fond de carte de la France en gris clair avec une frontière matérialisée en gris foncé, le réseau hydrologique et les sous-bassins hydrographiques de l'Adour-Garonne avec d'autres nuances de gris. La première série présente les résultats de l'analyse de tendance sur la période commune 1968-2020 et la seconde série les différences de moyennes entre les deux sous-périodes. La carte de l'analyse de tendance pour le débit annuel QA est prise pour exemple en Figure 13.

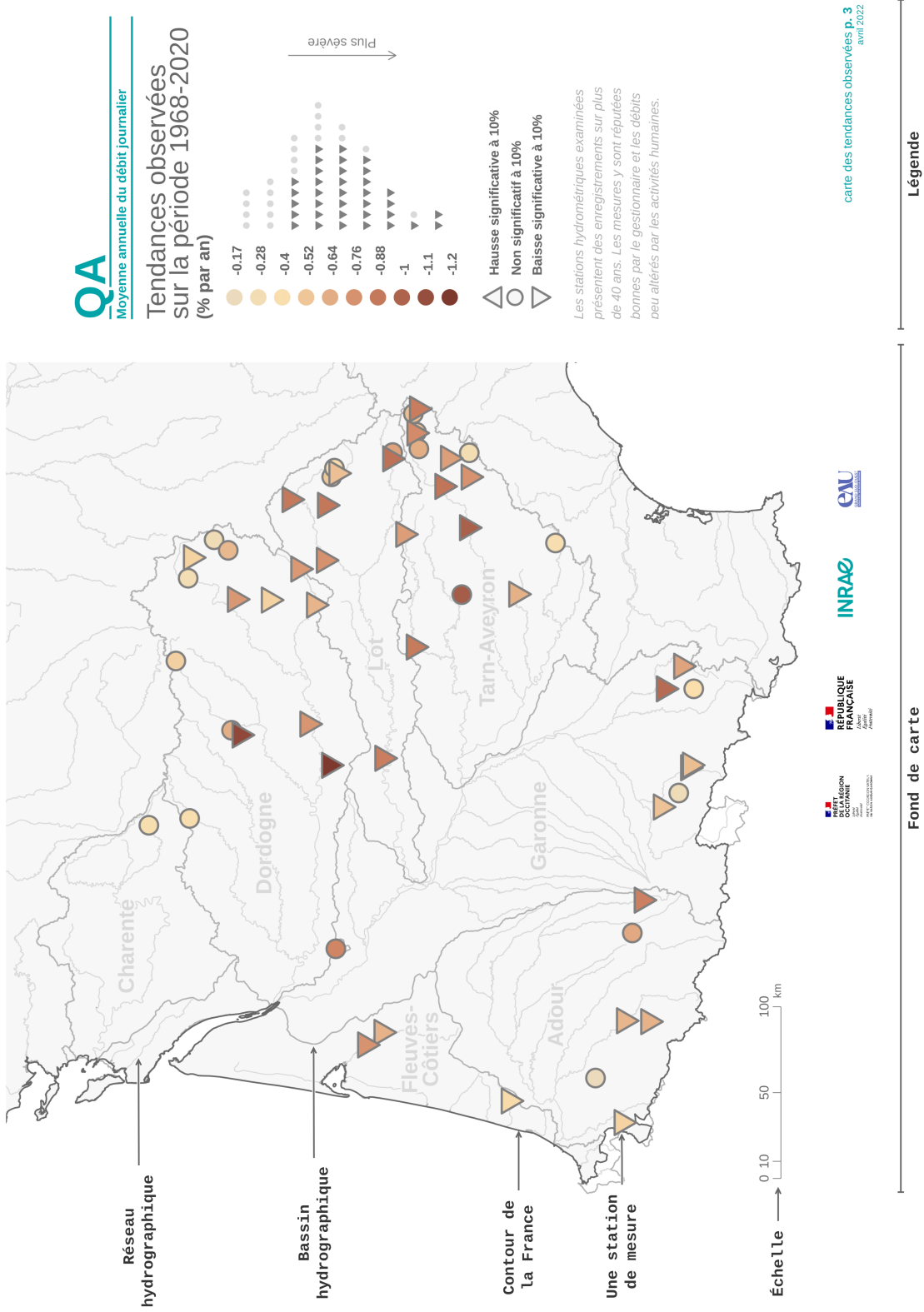


Figure 13. Carte des résultats de l'analyse de tendance pour le débit annuel QA.

La première série de cinq cartes est dédiée aux analyses de tendance. Les stations hydrométriques y sont identifiées par un symbole qui diffère selon la significativité de la tendance. Lorsque la tendance n'est pas significative au risque 10 %, la station hydrométrique est représentée par un disque de couleur. Dans le cas contraire, un triangle coloré pointant vers le haut est utilisé si la tendance est à la hausse et un triangle coloré pointant vers le bas si la tendance est à la baisse. Le choix des couleurs est une nouvelle fois réalisé de la même manière que précédemment. La légende (Figure 14) commence par le nom de l'indice et un rappel succinct de sa définition. En dessous, une échelle de couleur discrète est visible. Cette échelle est accompagnée d'un histogramme des valeurs des pentes calculées avec la même sémiologie graphique que celle de la carte.

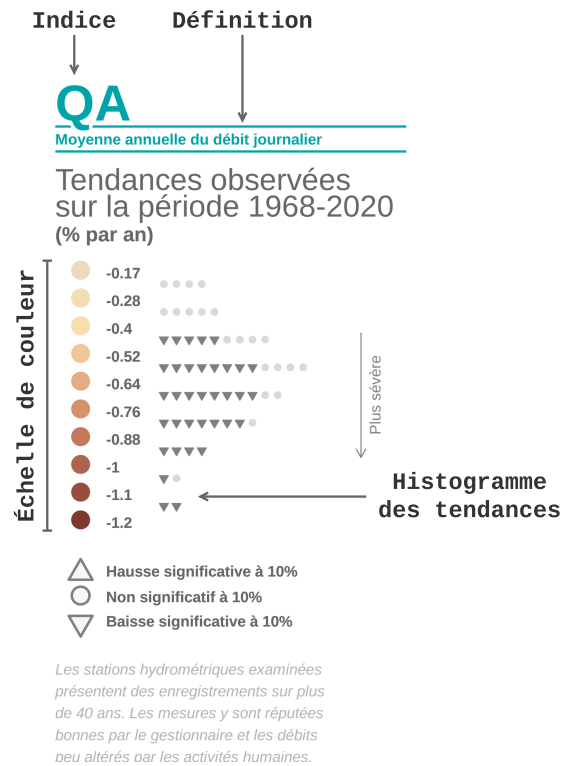


Figure 14. Légende de la carte d'une analyse de tendance.

La seconde série de carte concerne les différences des moyennes des indices entre les deux sous-périodes reprend les mêmes code graphique excepté pour les symboles utilisées. Pour mémoire, il n'y a pas de notion de significativité, donc les résultats des stations hydrométriques sont présentées dans des fonds de couleur.

4 Résultats

L'étude de stationnarité fait apparaître des modifications du régime des étiages à l'échelle du bassin Adour-Garonne, sur les trois indices de sévérité et l'indicateur du début d'étiage *tDEB* sur la période 1968-2020. Ainsi, entre 50 et 70 % des stations hydrométriques présentent des changements significatifs à 10 % sur les indices *QA*, *QMNA* et *VCN10*. Sur cette même période, des changements significatifs de date de début d'étiage *tDEB* ont été détectés sur 24 des 56 stations hydrométriques. Des modifications significatives anecdotiques sont identifiées sur deux stations hydrométriques pour ce qui concerne la date du centre des étiages *TCEN*.

Les changements sont cohérents à l'échelle du bassin Adour-Garonne. Les tendances, quand elles sont significatives, partagent le même signe (tendance à des étiages plus sévères et plus précoces). Cependant, l'intensité des changements n'est pas uniforme (entre -4 et -12% par décennie pour *QA*, entre -3.5 et -23 % par décennie pour *QMNA* et -3.6 et -26.3 % par décennie pour *VCN10*). De plus, les baisses des débits d'étiage les plus notables s'observent sur les affluents rive-droite de la Garonne (bassins hydrographiques du Lot et du Tarn-Aveyron et dans une moindre mesure celui de la Dordogne). En moyenne sur l'ensemble du bassin Adour-Garonne, entre 1968-1988 et 2000-2020, les débits *QA*, *QMNA* et *VCN10* ont chuté de -20 %.

Les changements significatifs de saisonnalité concernent principalement les bassins hydrographiques du Lot et du Tarn-Aveyron et dans une moindre mesure celui de la Dordogne. Peu de cours d'eau des Pyrénées affichent des évolutions significatives de *tDEB* (2 sur 13 stations hydrométriques en tête des bassins hydrographiques Adour et Garonne). En moyenne sur l'ensemble du bassin Adour-Garonne, entre

1968-1988 et 2000-2020, le début d'étiage s'est avancé de 16 jours.

Les sensibilités régionales pourraient s'expliquer par le régime hydrologique actuel des cours d'eau. Les rivières pyrénéennes sont en partie influencées par la constitution et la fonte du manteau neigeux. Ce n'est pas le cas des cours d'eau des bassins du Lot, du Tarn-Aveyron et de la Dordogne qui présentent des caractéristiques des régimes pluviaux avec des contributions mineures de la neige.

Ces résultats sont, sans être strictement les mêmes, cohérents avec ceux obtenus par le projet PI-RAGUA sur la période 1960-2019. Une diminution des débits naturels est perceptible sur le jeu de données et la période considérés. Cette cohérence s'explique par l'utilisation commune d'une variante du test de Mann-Kendall et d'un jeu de stations hydrométriques issues du RRSE.

Enfin, on peut s'interroger sur la part attribuable aux évolutions récentes du climat dans les changements constatés dans les étiages estivaux. Même si les débits traités sont *a priori* peu influencés par les actions humaines, il n'y a pas de réponse immédiate : pour répondre à cette question, des analyses supplémentaires pour examiner les causes des changements qui relèvent du domaine de l'attribution [Planton and Terray, 2007] sont nécessaires. Un examen des variables climatiques à l'échelle des bassins versants (moyenne de bassin à l'exutoire des bassins versants) issus de la réanalyse SAFRAN [Vidal et al., 2010] montre cependant la bonne cohérence entre, d'une part, la diminution du débit annuel *QA* et, d'autre part, la hausse significative de l'évapotranspiration de référence *ETPA* et la baisse non significative de la pluviométrie annuelle *PA* (présentée dans la section).

5 Conclusion

L'analyse menée confirme les résultats des études de stationnarité antérieures : des changements statistiquement significatifs sur les étiages sur la période 1968-2020 sont perceptibles parmi 56 stations hydrométriques aux débits peu influencés par les actions humaines et localisées en tête de bassin versant. Ces changements concernent les débits annuels (de septembre à août) et estivaux (saison de mai à novembre inclus). Les réductions des débits examinés ici *QA*, *QMNA* et *VCN10* varient entre -4 et -12% par décennie pour *QA*, entre -3.5 et -23 % par décennie pour *QMNA* et -3.6 et -26.3 % par décennie pour *VCN10*. La dynamique des étiages a évolué avec des étiages plus précoces (entre -10 et -50 jours entre les deux périodes 1968-1988 et 2000-2020, aux stations pour lesquelles le test indique une tendance significative à 10 %). En revanche, la date du centre de l'étiage n'a sensiblement pas évolué. L'analyse n'est valable que sur la période étudiée et les résultats ne peuvent pas être extrapolés pour calculer les indices dans les prochaines décennies.

6 Bibliographie

- Baulon, L., Allier, D., Massei, N., Bessière, H., Fournier, M., and Bault, V. (2020). Influence de la variabilité basse-fréquence des niveaux piézométriques sur l'occurrence et l'amplitude des extrêmes. *Géologues*, (207):53–60.
- Beguería, S. (2022). Caracterización de los recursos hídricos y escenarios futuros. *Rapport de fin de projet PIRAGUA (EFA210/16-PIRAGUA)*.
- Giuntoli, I. and Renard, B. (2010). *Identification des impacts hydrologiques du changement climatique: constitution d'un réseau de référence pour la surveillance des étiages*. PhD thesis, Irstea.
- Giuntoli, I., Renard, B., Vidal, J.-P., and Bard, A. (2013). Low flows in france and their relationship to large-scale climate indices. *Journal of Hydrology*, 482:105–118.
- Gudmundsson, L., Boulange, J., Do, H. X., Gosling, S. N., Grillakis, M. G., Koutroulis, A. G., Leonard, M., Liu, J., Müller Schmied, H., Papadimitriou, L., et al. (2021). Globally observed trends in mean and extreme river flow attributed to climate change. *Science*, 371(6534):1159–1162.
- Hamed, K. H. (2008). Trend detection in hydrologic data: The mann-kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, 349(3–4):350–363.
- Hamed, K. H. and Rao, A. R. (1998). A modified mann-kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1–4):182–196.
- Harrigan, S., Hannaford, J., Muchan, K., and Marsh, T. J. (2018). Designation and trend analysis of the updated uk benchmark network of river flow stations: The ukbn2 dataset. *Hydrology Research*, 49(2):552–567.
- IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (Eds)]. Cambridge University Press.
- Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods*. Griffin, London, UK.
- Lorenzo-Lacruz, J., Morán-Tejeda, E., Vicente-Serrano, S. M., and López-Moreno, J. I. (2013). Streamflow droughts in the iberian peninsula between 1945 and 2005: spatial and temporal patterns. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(1):119–134.
- Mann, H. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3):245–259.
- Masseroni, D., Camici, S., Cislighi, A., Vacchiano, G., Massari, C., and Brocca, L. (2021). The 63-year changes in annual streamflow volumes across europe with a focus on the mediterranean basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(10):5589–5601.
- Mo, K. C. and Lettenmaier, D. P. (2018). Drought variability and trends over the central united states in the instrumental record. *Journal of Hydrometeorology*, 19(7):1149–1166.
- Planton, S. and Terray, L. (2007). Détection et attribution à l'échelle régionale: le cas de la france. *La Météorologie*, 58:25–29.

- Ribeiro, L., Kretschmer, N., Nascimento, J., Buxo, A., Rötting, T., Soto, G., Señoret, M., Oyarzún, J., Matu-rana, H., and Oyarzún, R. (2015). Evaluating piezometric trends using the mann-kendall test on the alluvial aquifers of the elqui river basin, chile. *Hydrological Sciences Journal*, 60(10):1840–1852.
- Richard, Y., Castel, T., Bois, B., Cuccia, C., Marteau, R., Rossi, A., Thevenin, D., and Toussaint, H. (2014). Évolution des températures observées en bourgogne (1961–2011). *Bourgogne Nature*, 19:110–117.
- Sauquet, E., Gottschalk, L., and Krasovskaia, I. (2008). Estimating mean monthly runoff at ungauged locations: an application to france. *Hydrology Research*, 39:403–423.
- Shukla, S., Safeeq, M., AghaKouchak, A., Guan, K., and Funk, C. (2015). Temperature impacts on the water year 2014 drought in california. *Geophysical Research Letters*, 42(11):4384–4393.
- Stahl, K., Hisdal, H., Hannaford, J., Tallaksen, L., Van Lanen, H., Sauquet, E., Demuth, S., Fendekova, M., and Jódar, J. (2010). Streamflow trends in europe: evidence from a dataset of near-natural catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(12):2367–2382.
- Udall, B. and Overpeck, J. (2017). The twenty-first century colorado river hot drought and implications for the future. *Water Resources Research*, 53(3):2404–2418.
- Vicente-Serrano, S. M., Peña-Gallardo, M., Hannaford, J., Murphy, C., Lorenzo-Lacruz, J., Dominguez-Castro, F., López-Moreno, J. I., Beguería, S., Noguera, I., Harrigan, S., et al. (2019). Climate, irrigation, and land cover change explain streamflow trends in countries bordering the northeast atlantic. *Geophysical Research Letters*, 46(19):10821–10833.
- Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., and Soubeyroux, J.-M. (2010). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over france with the safran system. *International Journal of Climatology*, 30:1627–1644.
- Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., and Cavadias, G. (2002). The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological processes*, 16(9):1807–1829.

7 Annexe : Évolution des principales variables climatiques

Adour

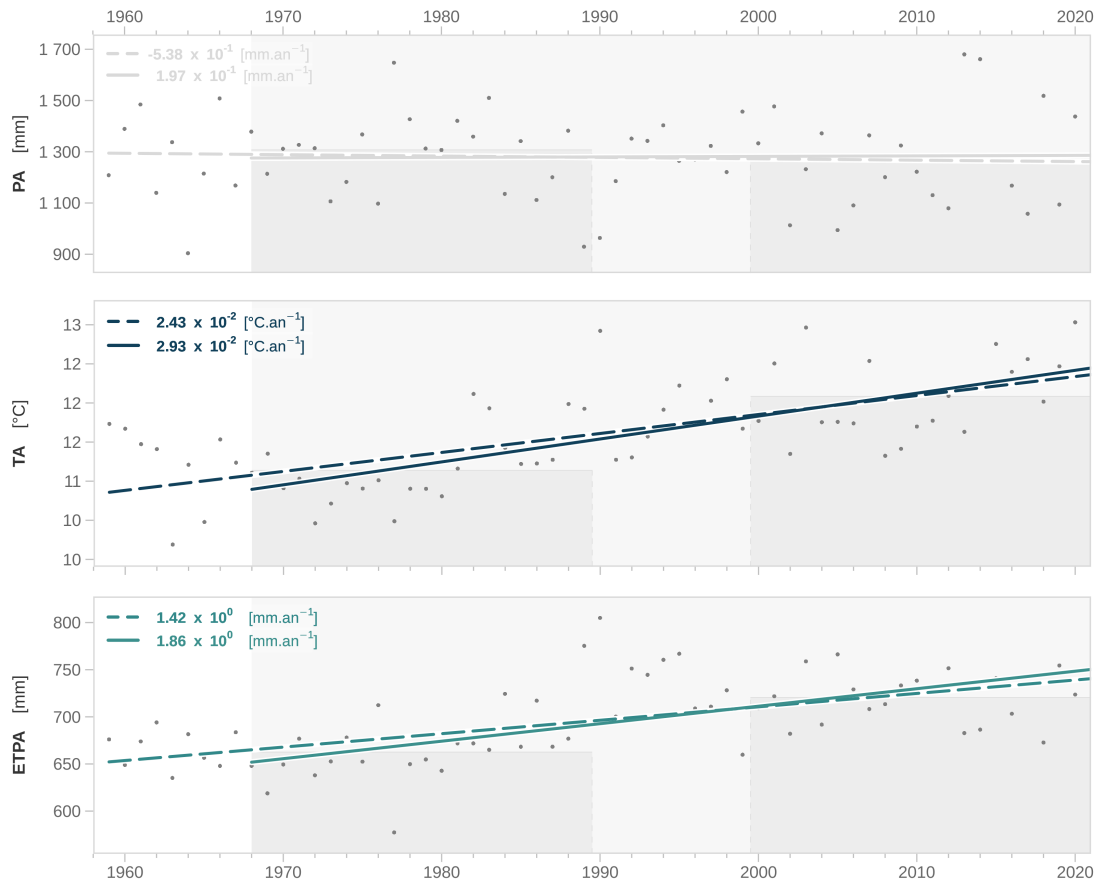


Figure 15. Évolution des précipitations annuelles *PA*, de la température annuelle *TA* et de l'évapotranspiration annuelle *ETPA* sur le bassin versant de l'Adour. Les tendances significatives sont indiquées en noir. Les droites sont tracées en pointillé pour la période 1958-2020 et en trait continu pour la période 1968-2020

Charente

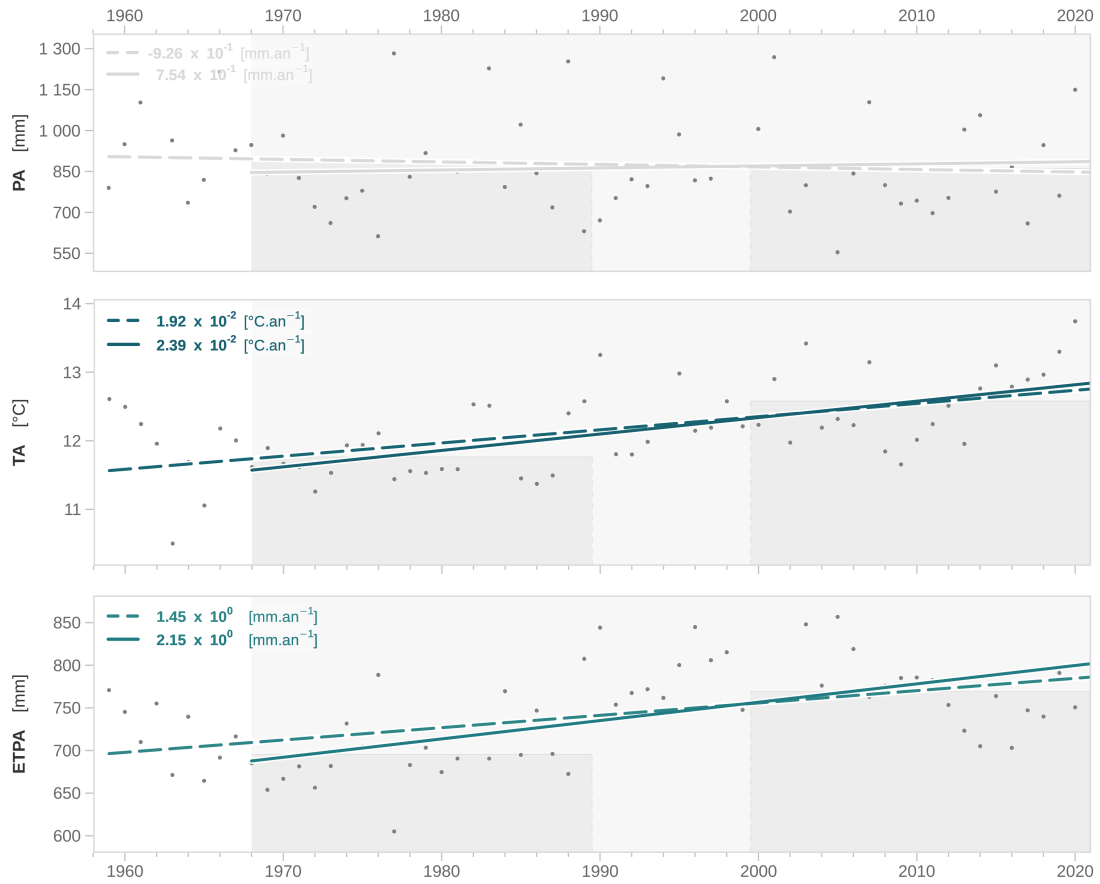


Figure 16. Évolution des précipitations annuelles *PA*, de la température annuelle *TA* et de l'évapotranspiration annuelle *ETPA* sur le bassin versant de la Charente. Les tendances significatives sont indiquées en noir. Les droites sont tracées en pointillé pour la période 1958-2020 et en trait continu pour la période 1968-2020

Dordogne

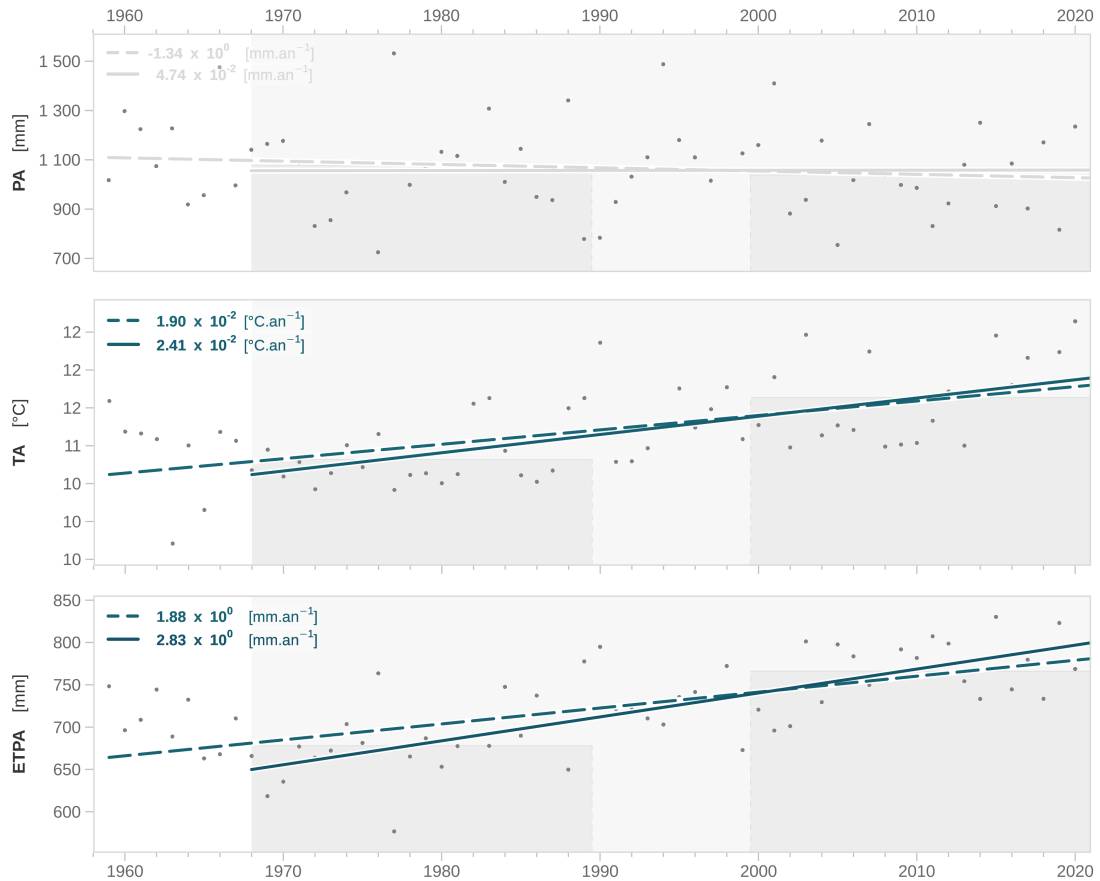


Figure 17. Évolution des précipitations annuelles *PA*, de la température annuelle *TA* et de l'évapotranspiration annuelle *ETPA* sur le bassin versant de la Dordogne. Les tendances significatives sont indiquées en noir. Les droites sont tracées en pointillé pour la période 1958-2020 et en trait continu pour la période 1968-2020

Garonne

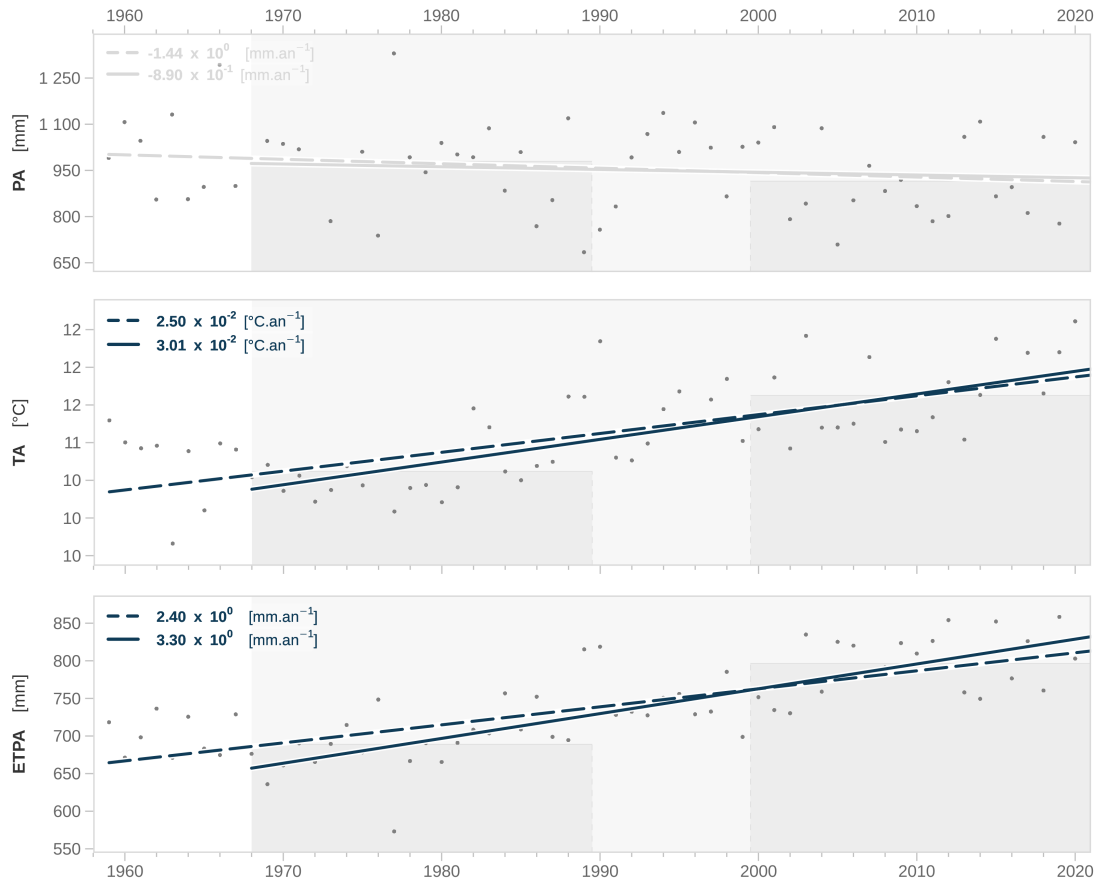


Figure 18. Évolution des précipitations annuelles PA , de la température annuelle TA et de l'évapotranspiration annuelle $ETPA$ sur le bassin versant de le Garonne. Les tendances significatives sont indiquées en noir. Les droites sont tracées en pointillé pour la période 1958-2020 et en trait continu pour la période 1968-2020