



HAL
open science

Analyse de stationnarité des étiages dans la vallée de la Garonne

Eric Sauquet, Louis Héraut

► **To cite this version:**

Eric Sauquet, Louis Héraut. Analyse de stationnarité des étiages dans la vallée de la Garonne. INRAE; SMAEG. 2024. <hal-04698255v2>

HAL Id: hal-04698255

<https://hal.inrae.fr/hal-04698255v2>

Submitted on 24 Aug 2025

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.



HAL Authorization



Analyse de stationnarité des étiages dans la vallée de la Garonne

Éric SAUQUET, Louis HÉRAUT

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

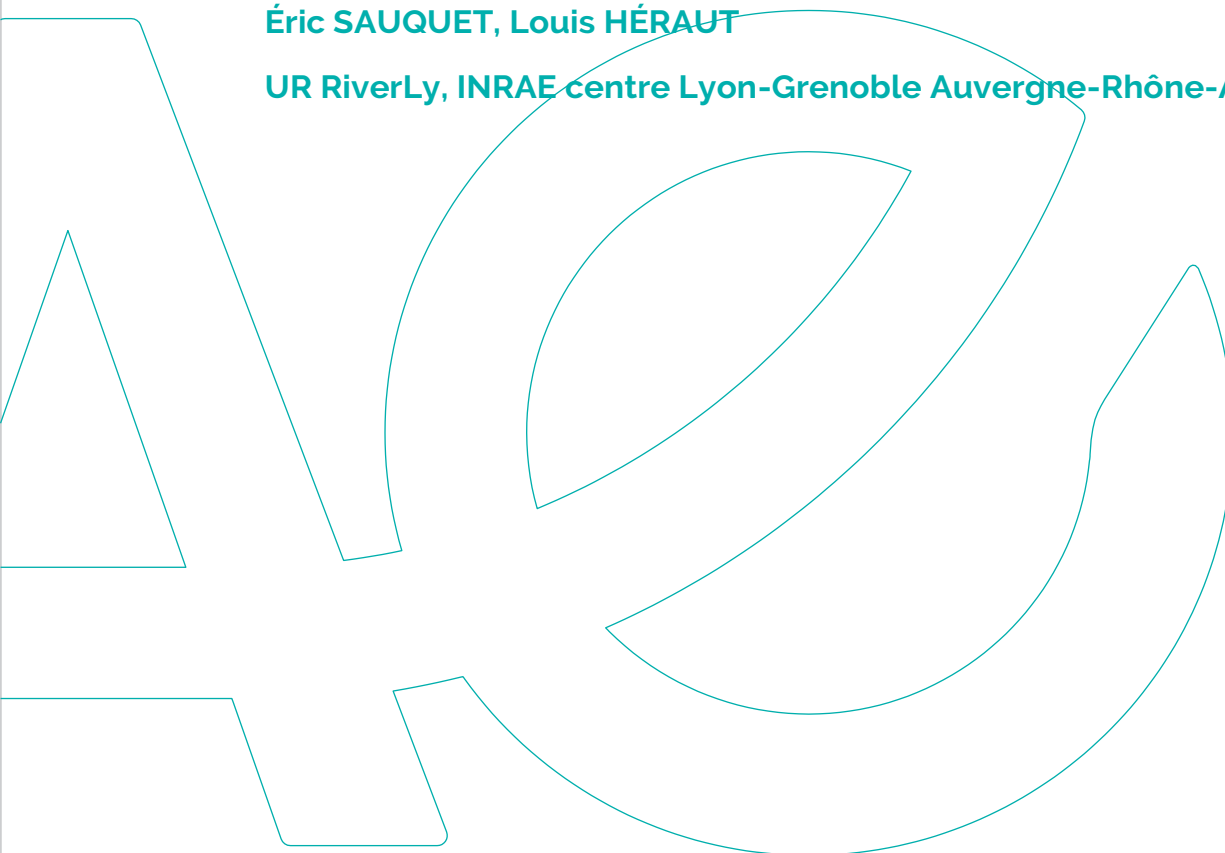


Table des matières

1. Introduction	2
2. Données et méthode	3
2.1. Données.....	3
2.2. Indicateurs hydrologiques.....	4
2.3. Caractérisation des changements.....	4
2.4. Supports de restitution	5
3. Résultats	7
3.1. A l'échelle du linéaire de la Garonne.....	7
3.2. A l'échelle du bassin Adour-Garonne.....	7
3.3. Aux sites (effet des actions humaines).....	9
3.1. En miroir des évolutions des paramètres du climat	10
4. Conclusion	11
5. Annexe	12
5.1. Test de Mann-Kendall et ses variantes.....	12
5.2. Pente de Sen.....	12
6. Références	13
7. Cartes et fiches de synthèse	14

1. Introduction

Cette étude s'inscrit la suite d'initiatives régionales visant la détection de changements dans les chroniques de débits. L'approche mise en œuvre repose sur des tests statistiques appliqués à de longues séries d'observations pour détecter d'éventuelles non-stationnarités. De telles études viennent compléter les analyses prospectives qui mobilisent une chaîne de modélisation numérique hydroclimatique, avec en entrée des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et en sortie des séries temporelles de variables d'intérêt, *i.e.* les débits ou les niveaux piézométriques pour les prochaines décennies.

De nombreuses études de stationnarité ont été menées et sont régulièrement actualisées pour détecter des changements dans les séries temporelles de variables descriptives du cycle de l'eau (cf. rapports du GIEC). A l'échelle régionale, la plus récente a été confiée à INRAE (Héraud *et al.*, 2022) à l'initiative de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne. Un ensemble de 56 stations hydrométriques aux débits peu influencés par les actions humaines et localisées en tête de bassin versant a ainsi été examiné. L'analyse – identifiée dans la suite du document par « étude AEAG2022 » – menée a confirmé les résultats des études de stationnarité antérieures et conclut à des changements statistiquement significatifs sur les étiages sur la période 1968-2020. Ils concernaient les débits annuels (de septembre à août) et estivaux (saison de mai à novembre inclus). L'étude a montré une réduction des débits examinés dont l'ampleur varie selon la variable considérée et le bassin considéré. La dynamique des étiages a évolué avec des étiages plus précoces. En revanche, il n'y a pas d'évolution sensible de la date du cœur de l'étiage. **L'objectif ici est d'examiner la stationnarité des débits du linéaire Garonne**, territoire de gestion du Syndicat mixte d'études et d'aménagement de la Garonne (SMEAG, Figure 1) en reprenant le même cadre méthodologique que l'étude AEAG2022 et en bénéficiant de chroniques étendues sur le bassin Adour-Garonne.

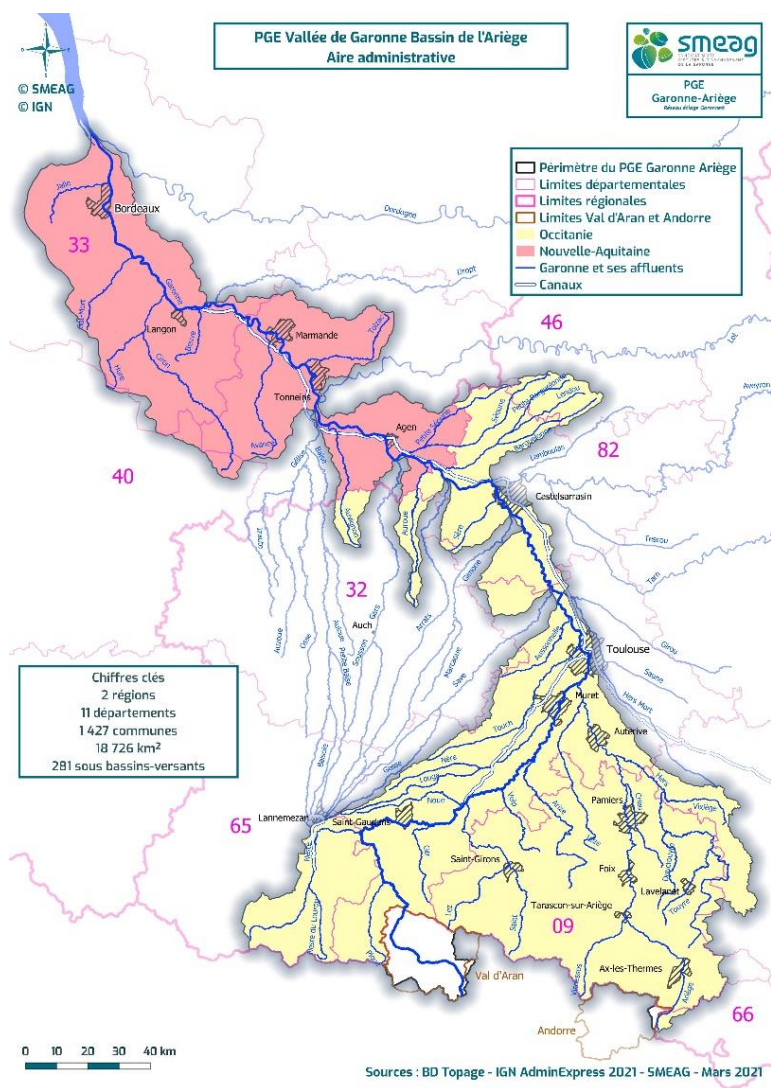


Figure 1 : Territoire de gestion du SMEAG

2. Données et méthode

Le cadre méthodologique, les stations hydrométriques et les données traitées sont en grande partie communes à l'étude AEAG2022 pour assurer une continuité et autoriser une comparaison entre les conclusions des deux études.

2.1. Données

Pour prétendre identifier des dérives imputables au changement climatique, les séries doivent être sélectionnées avec un soin particulier. Il faut :

- Une bonne qualité de mesure : en effet, des non stationnarités peuvent apparaître dans le cas de valeurs de débits biaisées par des dispositifs de mesure défectueux,
- Des données peu influencées par les actions anthropiques : dans le cas contraire, par exemple, une augmentation ou diminution progressive des prélèvements/rejets dans le bassin versant pourrait être à l'origine de tendances ; globalement les actions de gestion peuvent masquer ou accentuer les effets d'une dérive d'origine climatique.
- Des séries longues : le climat présente des variabilités décennales qui se transmettent aux variables hydrologiques et il est conseillé de traiter des chroniques longues (de plus de 30 ans) pour s'en abstraire.

Ces trois critères ont prévalu pour la constitution du jeu de données de l'étude AEAG2022.

Station	Code	X Lambert 93 (m)	Y Lambert 93 (m)	Surface (km ²)	Période	Complément
La Neste à Sarrancolin [EDF - Beyrède]	00174027	486109	6209898	606	2003-2022	
La Garonne [partielle] à Saint-Gaudens [Valentine]	00200020	513133	6224794	2230	2003-2022	1970-2015
La Garonne à Mancieux	00290030	533788	6230897	2679	2005-2022	
L'Arize à Rieux-Volvestre [Volvestre]	00794010	553201	6239736	476	2003-2022	
La Garonne à Marqufavé	00800010	557545	6247996	5243	2006-2022	1970-2020
Le Louge à Muret	00984010	563745	6263771	486	2003-2022	
Le Grand Hers à Calmont	01662910	585946	6244716	1350	2003-2022	
L'Ariège à Auterive	01712510	575621	6253417	3450	2003-2022	
Le Touch à Toulouse [Saint-Martin-du-Touch]	01984310	568852	6279085	515	2003-2022	
La Garonne à Portet-sur-Garonne	02000010	571836	6270997	9980	2003-2022	1970-2015
La Garonne à Verdun-sur-Garonne	02620020	558607	6307329	13730	2003-2022	1970-2015
Le Tarn à Ambialet	03840002	645832	6315063	4500	2003-2022	
Le Tarn à Rabastens [Saint-Sulpice]	04081010	594090	6299461	5284	2003-2022	
L'Agout à Saint-Lieux-lès-Lavaur [Le Port]	04802520	600916	6296480	3470	2004-2022	
Le Tarn à Villemur-sur-Tarn	04931010	579097	6310198	9100	2003-2022	
Le Tarn (aval)	n.c.	543500	633400	n.c.	2003-2022	
L'Aveyron à Laguépie [1]	05292510	617902	6339737	1582	2003-2022	
Le Viaur à Laguépie et à Saint-Martin-Laguépie [2]	05572910	617536	6338737	1530	2003-2022	
L'Aveyron à Montauban [Loubéjac]	05882510	567120	6333902	5230	2003-2022	
La Garonne à Lamagistère	06140010	526430	6338164	32350	2003-2022	1970-2015
Le Lot à Entraygues-sur-Truyère	07701540	665129	6393407	5442	2003-2022	
Le Célé à Orniac [Les Amis du Célé]	08133520	595028	6381003	1194	2003-2022	
Le Lot à Cahors	08231530	577624	6375858	9170	2003-2022	
Le Lot à Aiguillon	08661510	487794	6359897	10000	2003-2022	
La Garonne au Mas-d'Agenais et à Tonneins	09000010	485054	6369217	50100	2003-2022	1970-2015
La Garonne à Ambès	09790001	419614	6440087	56324	2003-2022	

Tableau 1 : Liste des stations aux débits naturalisés mises à disposition (le code et la surface sont des données issues de l'HydroPortail, n.c. = non connu ; en italique : valeurs estimées)

Ici, nous disposons de séries de débits corrigés des impacts anthropiques – dans la suite, nommés « débits reconstitués » – élaborées par le bureau d'étude Eaucéa, à la demande du SMEAG dans le cadre du Plan de gestion d'étiage (PGE) Garonne-Ariège 2018-2027, et mises à disposition par le SMEAG : elles concernent 26 points répartis sur l'ensemble du bassin de la Garonne sur la période 2003-2022 et six stations hydrométriques de la Garonne sur la période 1970-2015. Les

métadonnées ont été extraites de l'Hydroportail (<https://www.hydro.eaufrance.fr/>) en décembre 2022.

2.2. Indicateurs hydrologiques

La volonté a été de traiter plus particulièrement les étiages sur une période intégrant les opérations de gestion des étiages (du 1^{er} juillet au 31 octobre). **Par conséquent, un échantillonnage saisonnier est réalisé de sorte à ne sélectionner que les données du 1^{er} juin au 31 octobre de chaque année.** Une année sera considérée en lacune si elle comporte plus de trois jours sans donnée sur la période d'échantillonnage.

La période de basses eaux (l'étiage) est en premier lieu appréciée par son intensité, c'est-à-dire les valeurs des débits constatés. Quatre indicateurs hydrologiques ont été retenus dans cette catégorie et forment des séries temporelles :

- Le débit moyen Q_{JJASO} défini comme la moyenne des débits journaliers du 1^{er} juin au 31 octobre de l'année,
- Le débit d'étiage $QMNA$ défini comme le minimum parmi les débits mensuels de la période d'échantillonnage sur l'année considérée,
- Le débit d'étiage $VCN10$ défini comme le minimum du débit moyen sur 10 jours ($VC10$) de la période d'échantillonnage sur l'année considérée,
- Le débit d'étiage $VCN30$ défini comme le minimum du débit moyen sur 30 jours ($VC30$) de la période d'échantillonnage sur l'année considérée.

Trois indicateurs de la dynamique des étiages décrivent leur temporalité dans l'année. Ils s'appuient tous sur le franchissement d'un seuil¹ : le maximum des $VCN10$ de la période d'échantillonnage. Ces indicateurs sont :

- La date $t_{0\text{étiage}}$ du début d'étiage définie comme le jour de la première valeur de $VC10$ sous le maximum des $VCN10$ de la période d'échantillonnage sur l'année considérée,
- La date t_{VCN10} du centre d'étiage définie comme le jour de l'année du $VCN10$, c'est-à-dire le jour où le débit moyen sur dix jours $VC10$ est minimal de la période d'échantillonnage sur l'année considérée,
- La durée de l'étiage $dt_{\text{étiage}}$ définie comme la durée de la plus longue période continue de $VC10$ sous le maximum des $VCN10$ de la période d'échantillonnage sur l'année considérée.

Notons que l'événement associé à la durée $dt_{\text{étiage}}$ ne contient pas nécessaire la date du $VCN10$ et que le début de l'étiage a été privilégié au détriment de la fin de l'étiage pour son lien avec le début de périodes de restriction et/ou de soutien d'étiage.

2.3. Caractérisation des changements

La méthodologie suivie est celle de l'étude AEAG2022.

Un test de statistique (ici, le test de Mann-Kendall modifié, page 12) **mesure le caractère significatif du changement et un estimateur de la pente de la tendance linéaire quantifie l'intensité des changements** (ici, la pente de Sen, page 12). L'usage de la variante du test de Mann-Kendall prenant en compte de l'autocorrélation se justifie d'un point de vue hydrologique : les caractéristiques de l'étiage d'une année sont en effet partiellement dépendantes du climat et de l'hydrologie de l'année précédente du fait de l'existence des nappes et de leur inertie. Seule l'autocorrélation d'ordre 1 a été considérée ($k=1$ dans l'équation 6, page 12). 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 scientifique.

Toutes les stations ne satisfont pas à l'exigence des 30 années de données. **Seules les stations aux débits disponibles sur la période 1970-2022 ont fait l'objet d'une application du test de Mann-Kendall modifié.** Le Tableau 1 mentionne deux périodes de reconstitution des débits naturalisés partiellement recouvrantes. Une confiance plus grande (expertise du SMEAG et d'Eaucéa) est accordée aux valeurs reconstituées les plus récentes. Les séries traitées résultent donc d'une concaténation d'une première série 1970-2002 avec la seconde 2003-2022. Les pentes de Sen ont été calculées sur l'ensemble des stations sur la période commune 2003-2022 pour comparer les réponses hydrologiques des bassins versants soumis à une même séquence de climat. Les séries de moins de 15 ans n'ont pas été traitées car elles font apparaître des hétérogénéités locales dues à des périodes recouvrantes réduites. Les analyses ont été effectuées avec des outils codés en langage R (dans une version ultérieure de ceux utilisés dans l'étude AEAG2022, et utilisés actuellement sur la plateforme MAKAO (<https://makao.sk8.inrae.fr>, Héraud et Lang, 2022).

¹ Le choix du seuil est subjectif. Le choix fait ici permet de garantir l'existence d'une valeur par an et de s'assurer que les valeurs sont bien descriptives d'un étiage. Il y a une année particulière, celle pour laquelle le maximum des $VC10$ est observé : la durée associée à cette année sera certainement la plus faible de l'échantillon.

2.4. Supports de restitution

La **représentation des résultats sous forme de cartes** permet d'apprécier l'organisation spatiale des évolutions des caractéristiques hydrologiques à l'échelle régionale. Deux jeux de sept cartes, chacune associée à un indicateur, ont été produits avec la volonté d'une lecture autonome. Toutes les cartes présentent un fond de carte du sud-ouest de la France en gris clair avec la frontière matérialisée en gris foncé, le réseau hydrologique et les sous-bassins hydrographiques de l'Adour-Garonne avec d'autres nuances de gris moins prononcées.

Une première série de sept cartes est dédiée aux analyses de tendance aux stations hydrométriques sur les données peu influencées et reconstituées (Figure 2). Sur ces cartes sont reportés les résultats obtenus aux 56 stations sélectionnées pour l'étude AEAG2022 et les six stations additionnelles de la Garonne. Les stations y sont identifiées par un symbole qui diffère selon la significativité de la tendance. Lorsque la tendance n'est pas significative au risque $\alpha=10\%$, 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 significative et à la hausse et un triangle coloré pointant vers le bas si la tendance est significative et à la baisse.

La couleur est choisie dans une échelle de couleur divergente centrée en zéro définie par indicateur hydrologique et placée sur la droite. Les bornes hautes et basses sont fixées par le maximum en valeur absolue des pentes de Sen calculées pour l'indicateur, sur l'ensemble des périodes et des stations hydrométriques examinées.

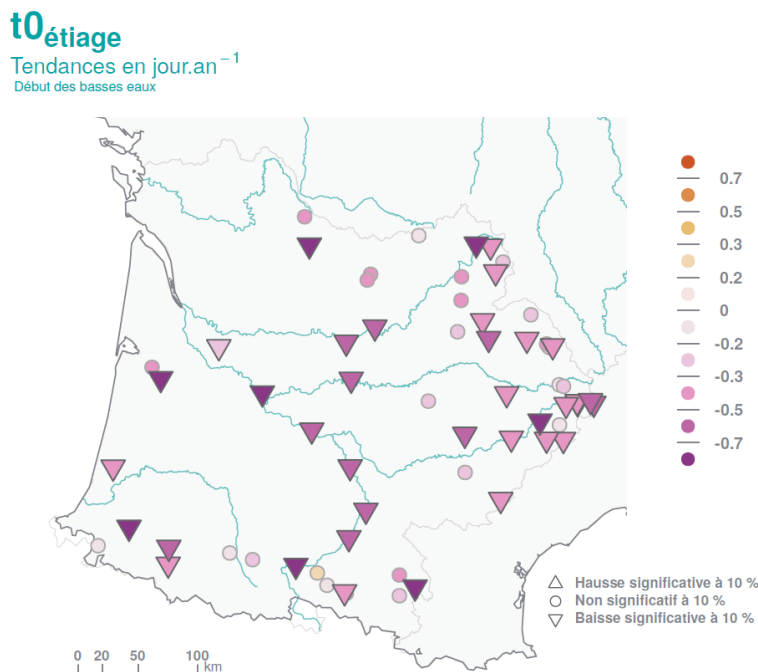


Figure 2 : Exemple de cartes illustrant les résultats de l'analyse de stationnarité sur des débits peu influencés ou reconstitués

La seconde série de cartes concerne les valeurs des pentes de Sen calculées sur la période 2003-2022. Elles renseignent la variabilité spatiale de la pente de Sen sur les 26 stations transmises par le SMEAG. Il n'y a pas de notion de significativité ici et l'intensité de la pente de Sen est donnée par la couleur du point ; d'où le message apposé en bas à droite sur ce type de carte : « Les valeurs des pentes de Sen ne préjugent pas de la stationnarité ou non des séries temporelles examinées. ».

Les **fiches « station »** sont des représentations propres à chaque station hydrométrique. Elles sont scindées en trois parties : l'en-tête, la chronique complète de débits journaliers et les résultats des analyses appliquées à chaque indicateur.

L'en-tête regroupe des informations générales sur la station hydrométrique (Figure 3), extraites des métadonnées de l'Hydroportail. Le titre rappelle le code Sandre de la station hydrométrique et son nom (la rivière et le lieu d'implantation de la station) et la nature des données traitées dans la fiche (« Débits reconstitués » ou « Débits influencés »). Les informations sont organisées en deux colonnes. La première colonne contient :

- La superficie en km² du bassin versant,
- Les coordonnées en m dans le système de projection Lambert93,

et la seconde colonne :

- La date de début et de fin de la chronique (la fin de la chronique est évidemment toute relative pour des stations

hydrométriques toujours en activité),

- Le nombre d'années disponibles,
- Le taux de lacune en % 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. Enfin, la carte placée dans la partie droite de cet en-tête permet de situer la station hydrométrique (point de couleur turquoise) et le contour du bassin versant associé en rouge.

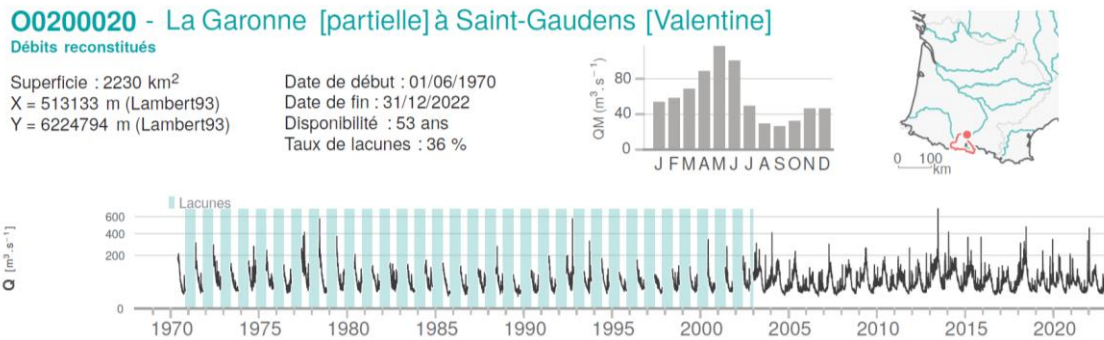


Figure 3 : Exemple d'en-tête des fiches « station »

La chronique tracée en noir est celle des débits journaliers traités en fonction du temps. Le graphique permet d'isoler les lacunes sur fond couleur turquoise.

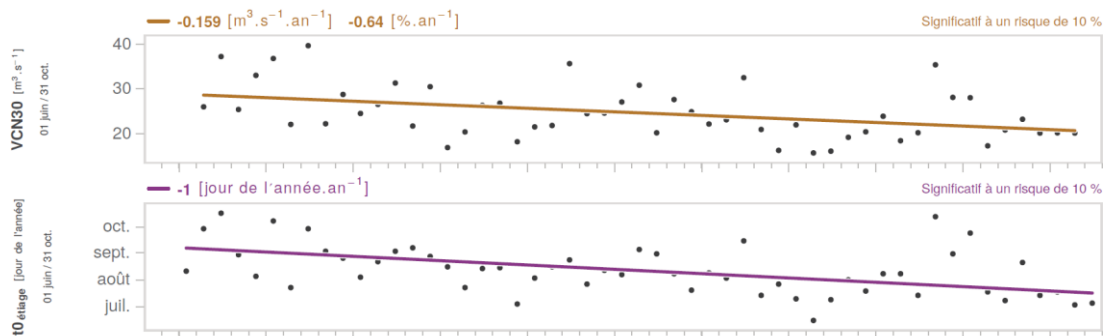


Figure 4 : Exemple de graphiques des fiches « station » illustrant les résultats de l'analyse de stationnarité

Les sept graphiques récapitulatifs de l'analyse de stationnarité pour les sept indicateurs sont alignés pour examiner l'éventuelle concomitance des changements et les années de l'axe des abscisses se lisent sur l'hydrogramme des débits journaliers. Ils présentent l'évolution temporelle des indicateurs. Deux exemples sont donnés en Figure 4 pour le débit VCN30 et pour la date de début d'étiage $t_{0\text{étiage}}$. La droite relative à la totalité de la chronique 1970-2022 est tracée avec pour pente celle donnée par l'estimateur de Sen et la droite passe par la moyenne de l'échantillon positionnée au milieu de la période de disponibilité des données.

Lorsque la tendance est significative au risque $\alpha=10\%$, la droite est tracée en couleur sinon elle est tracée en gris clair. Le caractère significatif ou non est indiqué en haut à droite de chaque graphique. La pente de Sen fixe la couleur de la droite, prise dans les palettes de cartes.

Les valeurs en haut à gauche des graphiques sont les pentes de Sen exprimées en $\text{m}^3/\text{s}/\text{an}$, et en $\%/ \text{an}$ de la moyenne de l'indicateur sur toute la période pour les variables de débits sinon en jour/an pour les variables renseignant la dynamique.

Ces fiches « station » sont élaborées en six (resp. quatre) stations de la Garonne dont les données reconstituées (resp. observés et influencés) sont disponibles (au moins 15 ans entre 1968-2022).

3. Résultats

3.1. A l'échelle du linéaire de la Garonne

Les résultats sont présentés sous forme de tableaux identifiant chacune des six stations de la Garonne.

L'étude de stationnarité fait apparaître des modifications du régime des étiages sur tout le linéaire de la Garonne : toutes les caractéristiques présentent des changements significatifs à l'exception de la date t_{VCN10} du centre d'étiage (Tableau 2, Tableau 3) sur la période 1968-2022.

Les quatre débits caractéristiques des étiages évoluent à la baisse. Les changements concernent l'intégralité du régime des étiages : les volumes écoulés pendant la saison d'étiage, c'est-à-dire en moyenne mais aussi sur les extrêmes, et sont perceptibles à différentes échelles de temps (10 jours, 30/31 jours et 5 mois). Il y a peu de variations des valeurs des tendances exprimées en %/an entre stations positionnées sur la Garonne sur le débit moyen Q_{JJASO} (autour de -1.1%/an). Pour les autres variables de débit, les changements exprimés en %/an et en $m^3/s/an$ augmentent de l'amont vers l'aval.

Les changements sur la dynamique des étiages sont moins notables : les évolutions portant sur les dates de début d'étiage révèlent des phénomènes plus précoces et les évolutions du centre d'étiage ne sont pas significatives selon le test statistique. La durée de l'étiage présente une tendance à la hausse significative partagée et le changement est d'ampleur équivalente sur l'ensemble des stations examinées (autour de +1 jour/an).

Station	Q_{JJASO}		Q_{MNA}		$VCN10$		$VCN30$	
	%/an	$m^3/s/an$	%/an	$m^3/s/an$	%/an	$m^3/s/an$	%/an	$m^3/s/an$
La Garonne [partielle] à Saint-Gaudens [Valentine]	-1.08	-0.58	-0.57	-0.15	-0.42	-0.09	-0.64	-0.16
La Garonne à Marquefave	-1.21	-1.17	-0.64	-0.29	-0.42	-0.15	-0.67	-0.28
La Garonne à Portet-sur-Garonne	-1.18	-1.6	-0.71	-0.49	-0.58	-0.32	-0.65	-0.41
La Garonne à Verdun-sur-Garonne	-1.02	-1.46	-0.7	-0.51	-0.49	-0.28	-0.61	-0.41
La Garonne à Lamagistère	-1.03	-2.35	-0.81	-0.98	-0.69	-0.68	-0.8	-0.9
La Garonne au Mas-d'Agenais et à Tonneins	-1.13	-3.52	-1.01	-1.68	-0.88	-1.18	-1.06	-1.64

Tableau 2 : Tendances linéaires sur les débits caractéristiques selon la pente de Sen calculée sur les débits reconstitués de la Garonne sur la période de disponibilité entre 1968 et 2022 (les tendances non significatives au sens du test de Mann-Kendall au risque 10% sont indiquées en italique)

Station	$t_{0\text{étiage}}$	t_{VCN10}	$dt_{\text{étiage}}$
	jour/an	jour/an	jour/an
La Garonne [partielle] à Saint-Gaudens [Valentine]	-1	0.07	1.18
La Garonne à Marquefave	-0.69	-0.04	0.91
La Garonne à Portet-sur-Garonne	-0.64	-0.06	1
La Garonne à Verdun-sur-Garonne	-0.78	0.3	1.33
La Garonne à Lamagistère	-0.62	-0.07	1.18
La Garonne au Mas-d'Agenais et à Tonneins	-0.76	-0.1	1.14

Tableau 3 : Tendances linéaires sur les dynamiques des étiages selon la pente de Sen calculée sur les débits reconstitués ou peu influencés de la Garonne sur la période de disponibilité entre 1968 et 2022 (les tendances non significatives au sens du test de Mann-Kendall au risque 10% sont indiquées en italique)

3.2. A l'échelle du bassin Adour-Garonne

Les résultats sont mis en perspective des analyses faites aux 56 stations hydrométriques de l'étude AEAG2022 en Figure 5 et en Figure 6. Les rectangles des boîtes à moustache décrivent l'intervalle interquartile pour ces 56 stations hydrométriques, c'est-à-dire les valeurs entre le premier quartile (valeur dépassée sur 75 % de l'échantillon) et le troisième quartile (valeur dépassée sur 25 % de l'échantillon). La comparaison concerne des analyses sur des débits jugés peu influencés ou naturels reconstitués sur des données actualisées de l'étude AEAG2022, c'est-à-dire complétées des deux années 2021 et 2022.

Les données des tendances obtenues ici sur la période 1968-2022 ont pu être comparées à celles de l'étude AEAG2022. L'ajout des deux années 2021-2022 ne modifie pas sensiblement les statistiques de l'étude AEAG2022. Ceci est perceptible

sur les tendances sur les variables de débit communes aux deux études :

- pour le QMNA, l'intervalle interquartile est $[-0.98 ; -0.40]$ %/an pour l'étude AEAG2022 contre $[-1.09 ; -0.54]$ %/an pour cette présente étude,
 - pour le VCN10, il est $[-1.06 ; -0.28]$ %/an pour l'étude AEAG2022 contre $[-1.00 ; -0.48]$ %/an pour cette étude,
- et les indicateurs de la dynamique des étiages communs aux deux études :
- pour la date $t_{0\text{étiage}}$ du début d'étiage, l'intervalle interquartile est $[-0.67 ; -0.22]$ jour/an pour l'étude AEAG2022 contre $[-0.57 ; -0.27]$ jour/an pour cette présente étude,
 - pour la date $t_{\text{VCN}10}$ du centre d'étiage, il est $[-0.07 ; 0.22]$ jour/an pour l'étude AEAG2022 contre $[-0.07 ; 0.30]$ jour/an pour cette étude.

Les intervalles interquartiles sont fortement recouvrants. Les valeurs des pentes pour les débits sont ici un peu plus prononcées certainement du fait de l'année 2022 particulièrement sévère observée en fin des chroniques.

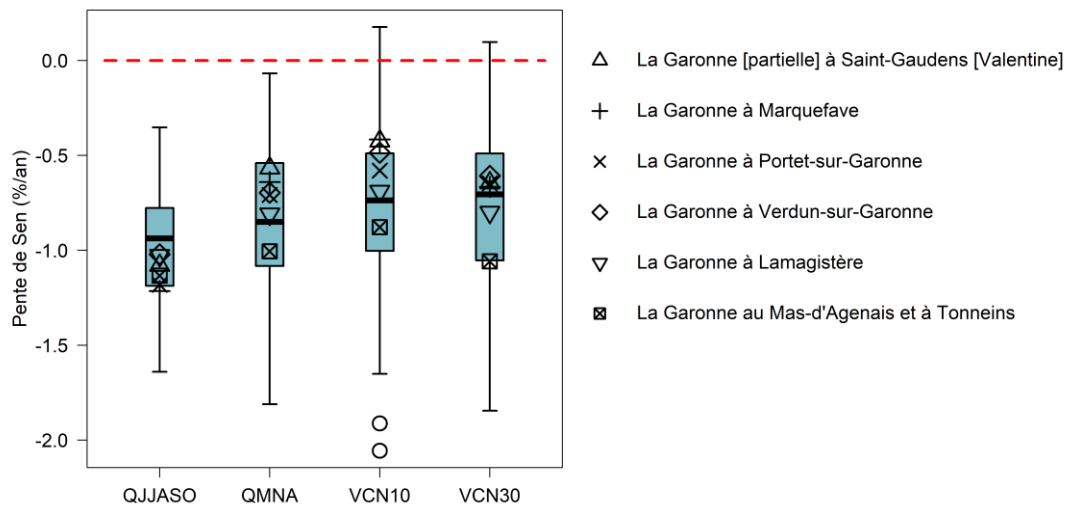


Figure 5 : Distribution des pentes de Sen pour les débits caractéristiques sur les données reconstituées ou peu influencés du bassin Adour-Garonne. La boîte à moustaches est construite sur les valeurs aux 56 stations hydrométriques de l'étude AEAG2022. Le rectangle de chaque boîte à moustaches est défini par les premiers Q1 et derniers quartiles Q3; ils contiennent 50% des valeurs. La barre en trait épais noir indique la médiane. Les points représentés par des cercles sont en dehors de l'intervalle $[Q1-1.5 \times (Q3-Q1); Q3+1.5 \times (Q3-Q1)]$.

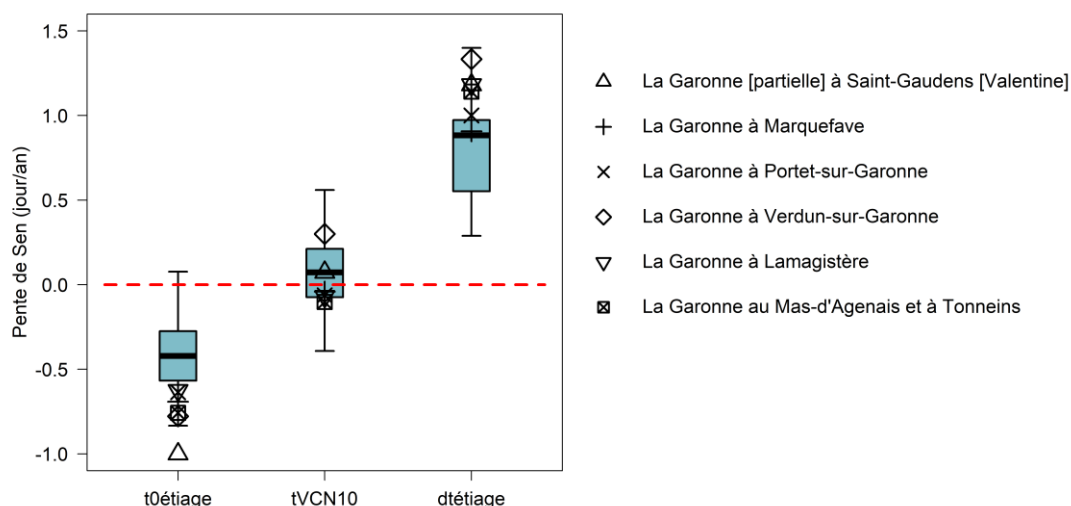


Figure 6 : Distribution des pentes de Sen pour les indicateurs temporels sur les données reconstituées ou peu influencés du bassin Adour-Garonne. La boîte à moustaches est construite sur les valeurs aux 56 stations hydrométriques de l'étude AEAG2022. Le rectangle de chaque boîte à moustaches est défini par les premiers et derniers quartiles; ils contiennent 50% des valeurs. La barre en trait épais noir indique la médiane.

Les valeurs des tendances pour la Garonne sont identifiées par des points superposés aux boîtes à moustaches, chaque station est associée à une symbolique différente. Ces points se situent dans les rectangles pour ce qui concerne les débits caractéristiques : les valeurs ne sont pas atypiques comparativement aux tendances constatées sur les cours d'eau du bassin

Adour-Garonne. Les changements sur la Garonne s'inscrivent donc dans les changements constatés sur les 56 cours d'eau du bassin Adour-Garonne. En revanche, nous constatons des tendances plus marquées sur la date de début d'étiage et sur la durée d'étiage. Cette particularité pourrait être due à un effet cumulatif ou effet d'échelle car les bassins de la Garonne examinés ici ont des surfaces drainées bien supérieures à celles des 56 bassins versants retenues pour l'étude AEAG2022. Retenons que les signes des changements sur les variables caractérisant la dynamique sont cohérents avec ceux des cours d'eau du bassin Adour-Garonne.

3.3. Aux sites (effet des actions humaines)

Quatre stations hydrométriques ont fait l'objet d'une analyse de stationnarité sur les débits observés – donc influencés par les usages et les actions de soutien d'étiage. Elles répondent aux exigences de disponibilité sur plus de 15 ans.

Contrairement aux conclusions sur les débits reconstitués, toutes les chroniques ne présentent pas des changements significatifs en particuliers sur les débits caractéristiques.

Notons que l'interprétation des résultats doit être faite avec précautions. Les valeurs moyennes des débits caractéristiques Q_{JJASO} , $QMNA$, $VCN10$ et $VCN30$ observés pour la Garonne sont plus faibles sur la période 1968-2022 qu'en contexte naturel, du fait des prélèvements et du soutien d'étiage. Les valeurs en %/an du Tableau 2 et du Tableau 4 ne sont pas tout à fait comparables car la référence n'est pas la même (les valeurs moyennes des débits caractéristiques dans le contexte anthropisé sont plus faibles que celles issues des débits reconstitués). Les changements sur la dynamique des étiages sont assez similaires à ceux observés sur les débits reconstitués. La date de début des étiages et leur durée (Tableau 5) présentent des évolutions statistiquement significatifs (précocité des étiages récents et durée allongée) mais dans des intensités moindres que celles constatées sur les débits naturels (Tableau 3). La date du centre des étiages n'évolue pas significativement. Ici, notons que les seuils sont différents aux stations selon qu'on considère le contexte anthropisé ou naturel.

Les actions anthropiques masquent partiellement les tendances naturelles de l'hydrologie de la Garonne. Contrairement aux conclusions de l'analyse sur les débits naturels, les changements ne sont pas tous significatifs. Ici, nous pouvons soupçonner l'action régulatrice de soutien d'étiage qui « tamponne » les variations interannuelles des débits en garantissant un débit plancher, différent selon les années car fonction des moyens à disposition ou de la sévérité de l'étiage. Cette action de soutien a un effet antagoniste à celui du changement climatique (a minima des variations climatiques qui induisent une diminution de la ressource).

Station	Q_{JJASO}		$QMNA$		$VCN10$		$VCN30$	
	%/an	m ³ /s/an	%/an	m ³ /s/an	%/an	m ³ /s/an	%/an	m ³ /s/an
La Garonne [partielle] à Saint-Gaudens [Valentine]	-0.76	-0.32	-0.1	-0.02	<i>0.18</i>	<i>0.03</i>	<i>0.18</i>	<i>0.04</i>
La Garonne à Portet-sur-Garonne	-1.05	-1.29	-0.42	-0.25	-0.23	-0.11	-0.34	-0.19
La Garonne à Verdun-sur-Garonne	-0.95	-1.18	-0.4	-0.24	-0.09	-0.04	-0.22	-0.12
La Garonne à Lamagistère	-1.04	-2.16	-0.75	-0.77	-0.58	-0.46	-0.60	-0.56

Tableau 4 : Tendances linéaires sur les débits caractéristiques selon la pente de Sen calculée sur les débits observés influencés de la Garonne sur la période de disponibilité entre 1968 et 2022 (les tendances non significatives au sens du test de Mann-Kendall au risque 10% sont indiquées en italique).

Station	$t_{0\text{étiage}}$	t_{VCN10}	$dt_{\text{étiage}}$
	jour/an	jour/an	jour/an
La Garonne [partielle] à Saint-Gaudens [Valentine]	-0.45	<i>0.33</i>	1.09
La Garonne à Portet-sur-Garonne	-0.6	<i>0.33</i>	1
La Garonne à Verdun-sur-Garonne	-0.57	<i>0.19</i>	1.08
La Garonne à Lamagistère	-0.52	-0.08	1.14

Tableau 5 : Tendances linéaires sur les dynamiques des étiages selon la pente de Sen calculée sur les débits observés influencés de la Garonne sur la période de disponibilité entre 1968 et 2022 (les tendances non significatives au sens du test de Mann-Kendall au risque 10% sont indiquées en italique).

3.1. En miroir des évolutions des paramètres du climat

Quelle est l'origine des évolutions constatées sur les débits ? Une grande partie est expliquée par les évolutions du climat constatés sur les dernières décennies. Les débits traités sur la Garonne sont *a priori* peu influencés par les actions humaines, il n'y a pour autant pas de réponse immédiate : pour répondre définitivement à cette question, des analyses supplémentaires pour examiner les causes des changements qui relèvent du domaine de l'attribution sont nécessaires.

Un examen des variables climatiques à l'échelle des bassins versants des paramètres principaux (Figure 7) qui conditionne l'hydrologie des étiages : la température, les précipitations et l'évapotranspiration centré sur le cœur de l'été (JJAS, de juin à septembre inclus)(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 des débits d'étiage et, d'autre part, la hausse significative de l'évapotranspiration de référence ETPJJAS et la baisse non significative de la pluviométrie estivale PJJAS (présentée dans la section).

La Figure 7 illustre la notion de variabilité interne du climat. Le caractère chaotique du climat s'exprime par des variabilités interannuelles particulièrement sensibles sur les précipitations et ce qui rend difficile l'identification d'un signal de fond.

Cela montre également le caractère « local » de pentes calculées sur des périodes courtes (tendance à la hausse des précipitations sur la période 1961-1992 et à la baisse entre 1992-2021) et non représentatives des tendances sur le long terme. C'est en partie ce qui explique la forte hétérogénéité relevée sur les cartes avec les tendances linéaires calculées entre 2003 et 2022 qui reflètent l'enchaînement des conditions météorologiques, plus que des évolutions climatiques. Les « signaux » qu'elles renvoient ne sont pas cohérents avec la tendance de long terme (2003 est l'année la plus critique en certains points et de ce fait les pentes peuvent indiquer un signal à la hausse ou une absence de changement des débits d'étiage). Les cartes de tendance sur la période 2003-2022 produites et disponibles en fin de rapport n'ont pas été exploitées dans une perspective de détecter des tendances potentiellement attribuables au climat.

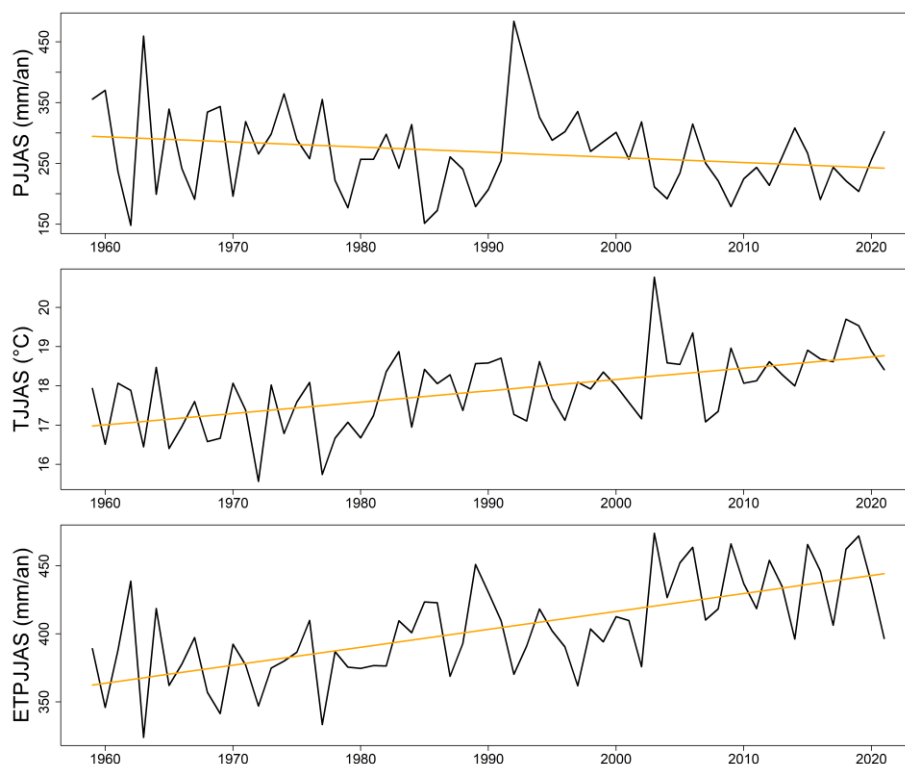


Figure 7 : Evolution des cumuls de précipitations, températures moyennes et cumuls d'évapotranspiration potentielle pour la Garonne à son exutoire, calculés de juin à septembre inclus et tendance linéaire (—) selon la pente de Sen calculée sur la période 1959-2021.

4. Conclusion

L'analyse menée ici a repris la méthodologie de l'étude AEAG2022 réalisée à l'échelle du bassin Adour-Garonne (Héraut *et al.*, 2022) appliquée ici aux séries de débits naturels reconstitués et observés (donc anthropisés) du fleuve Garonne sur la période 1968-2022.

Les changements identifiés sur l'hydrologie naturelle de la Garonne concernent l'ensemble des caractéristiques de débits (moyenne et extrêmes des étiages) et de la dynamique des étiages (début et durée) sur la période juin à octobre inclus.

Globalement, les changements sont cohérents en termes de signe de la tendance et de l'intensité avec les constats sur les cours d'eau du bassin Adour-Garonne.

Les changements identifiés concernent l'amont de la Garonne à Saint-Gaudens, se propagent et, d'une certaine manière, se cumulent (i.e. valeurs des pentes des tendances en $\text{m}^3/\text{s}/\text{an}$ qui augmentent) du fait de changements sur les affluents.

Sur la période d'analyse 1968-2022, l'application du test statistique de Mann-Kendall suggère une diminution significative des débits à la baisse et des étiages significativement plus précoces et plus longs.

Les changements sur les débits reconstitués sont plus importants et plus significatifs que sur les débits observés influencés (effet régulateur et soutien d'étiage qui réduit les risques de faibles valeurs).

L'analyse n'est valable que sur la période étudiée et les résultats ne peuvent pas être extrapolés pour calculer les indicateurs dans les prochaines décennies.

5. Annexe

5.1. 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. Dans la suite, nous noterons $X_i, i=1, \dots, n$ la série des valeurs de l'indice à tester pour une station hydrométrique donnée.

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

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

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

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

et

$$\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (3)$$

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 , $\text{Var}(S)$, est alors remplacée dans l'équation par :

$$\text{Var}(S) = \left(n(n-1)(2n+5) - \sum_{k=1}^n t_k k(k-1)(2k+5) \right) / 18 \quad (4)$$

où t_k est le nombre de valeurs conduisant à k exæquo.

Une autre version (Hamed, 1998, 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 légitime 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 à l'équation (4) ($\text{Var}_{\rho=0}(S)$) tel que :

$$\text{Var}_{\rho}(S) = \gamma \text{Var}_{\rho=0}(S) \quad (5)$$

$$\gamma = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{k=1}^{n-1} (n-k)(n-k-1)(n-k-2)\rho_k \quad (6)$$

où l'auto-corrélation d'ordre k , $\rho(k)$, 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 :

$$|Z| > u_{(1-\alpha/2)} \quad (7)$$

où $u_{(1-\alpha/2)}$ est le quantile de la loi normale standard de probabilité au dépassement $1-\alpha/2$. La valeur α est à fixer par l'opérateur ; il s'agit du risque de première espèce.

5.2. 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 $(X_j - X_i)/(Y_j - Y_i), i=1, \dots, n$ calculées pour toutes les paires de points. Dans le contexte d'une analyse de tendance, la pente de Sen est la médiane des pentes $(X_j - X_i)/(t_j - t_i), i=1, \dots, n$ où $t_i, i=1, \dots, n$ désignent les dates associées aux $X_i, i=1, \dots, n$.

6. Références

- 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.
- Hérait L., Lang M. (2022). Note explicative : MAKHO. INRAE. p. 17. hal-04421504.
- Hérait, L., Sauquet, E., Mansanarez, V. (2022). Analyse de stationnarité des étiages dans le bassin Adour-Garonne. INRAE Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes ; Agence de l'eau Adour-Garonne. p. 26. hal-03856262.
- Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods*. Griffin, London, UK.
- Mann, H. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3):245-259.

7. Cartes et fiches de synthèse

Carte de tendance- Avec test de Mann-Kendall

- QJJASO
- QMNA
- VCN10
- VCN30
- t0étiage
- tVCN10
- dtétiage

Carte de tendance- Sans test de Mann-Kendall

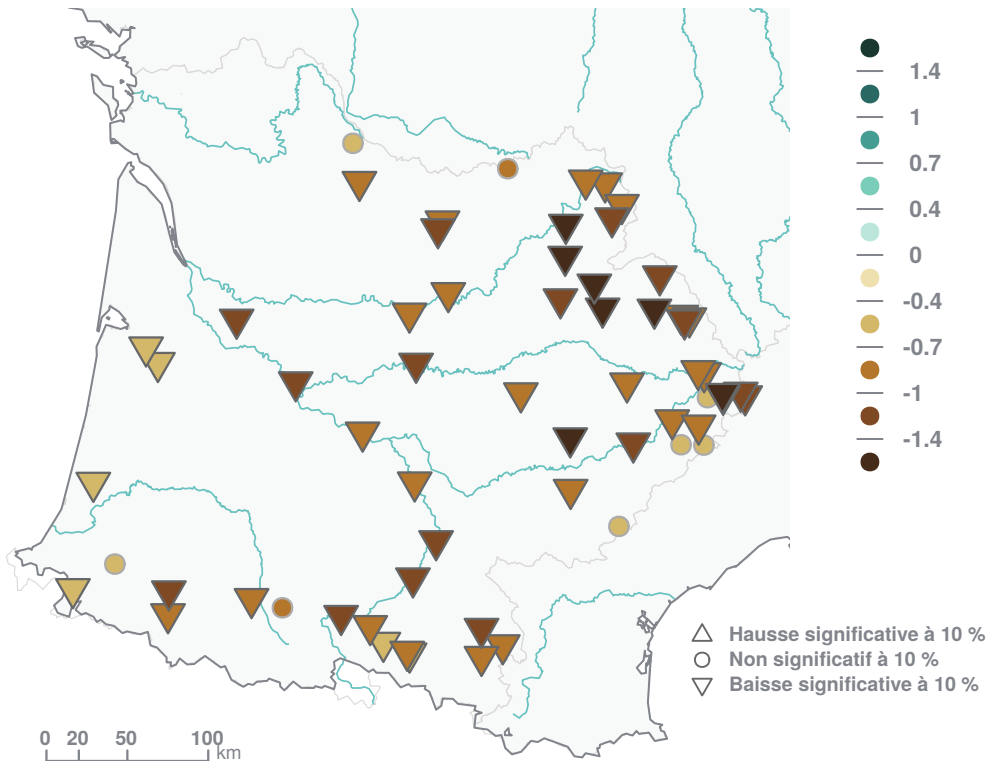
- QJJASO
- QMNA
- VCN10
- VCN30
- t0étiage
- tVCN10
- dtétiage

Fiche station - Débits naturels reconstitués

- La Garonne [partielle] à Saint-Gaudens [Valentine] (O0200020)
- La Garonne à Marquefave (O0800010)
- La Garonne à Portet-sur-Garonne (O2000010)
- La Garonne à Verdun-sur-Garonne (O2620020)
- La Garonne à Lamagistère (O6140010)
- La Garonne au Mas-d'Agenais et à Tonneins (Og000010)

Fiche station - Débits influencés observés

- La Garonne [partielle] à Saint-Gaudens [Valentine] (O0200020)
- La Garonne à Portet-sur-Garonne (O2000010)
- La Garonne à Verdun-sur-Garonne (O2620020)
- La Garonne à Lamagistère (O6140010)

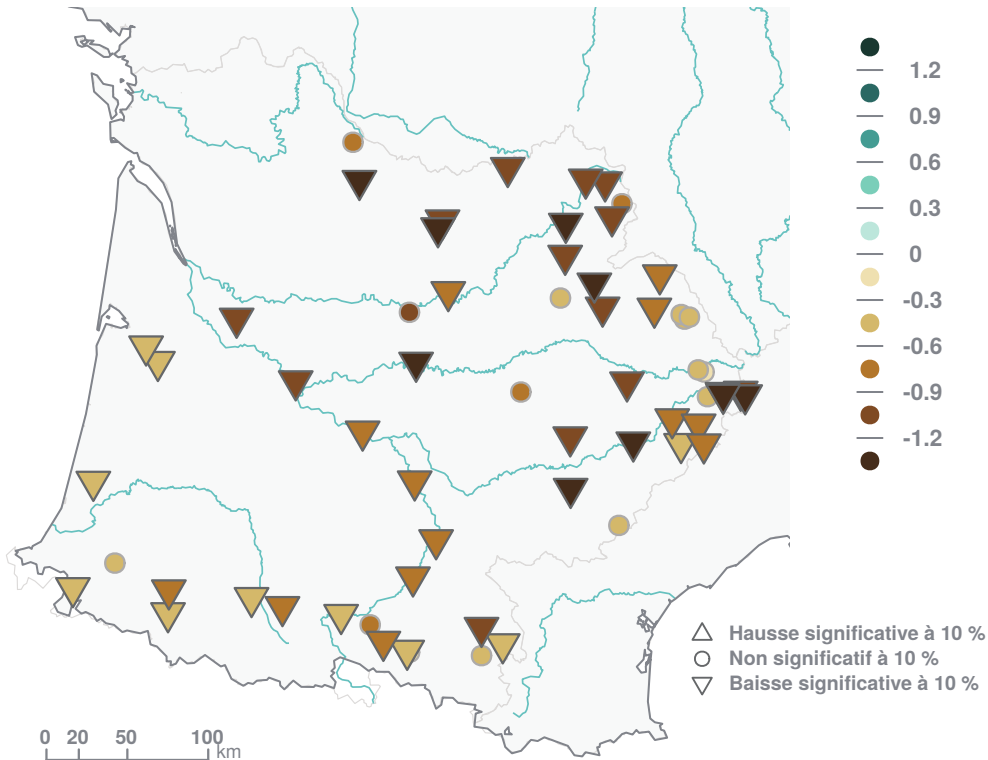


QMNA

Minimum annuel des débits mensuels

Tendances en $\%. \text{an}^{-1}$

Période du 01/01/1968 au 31/12/2022

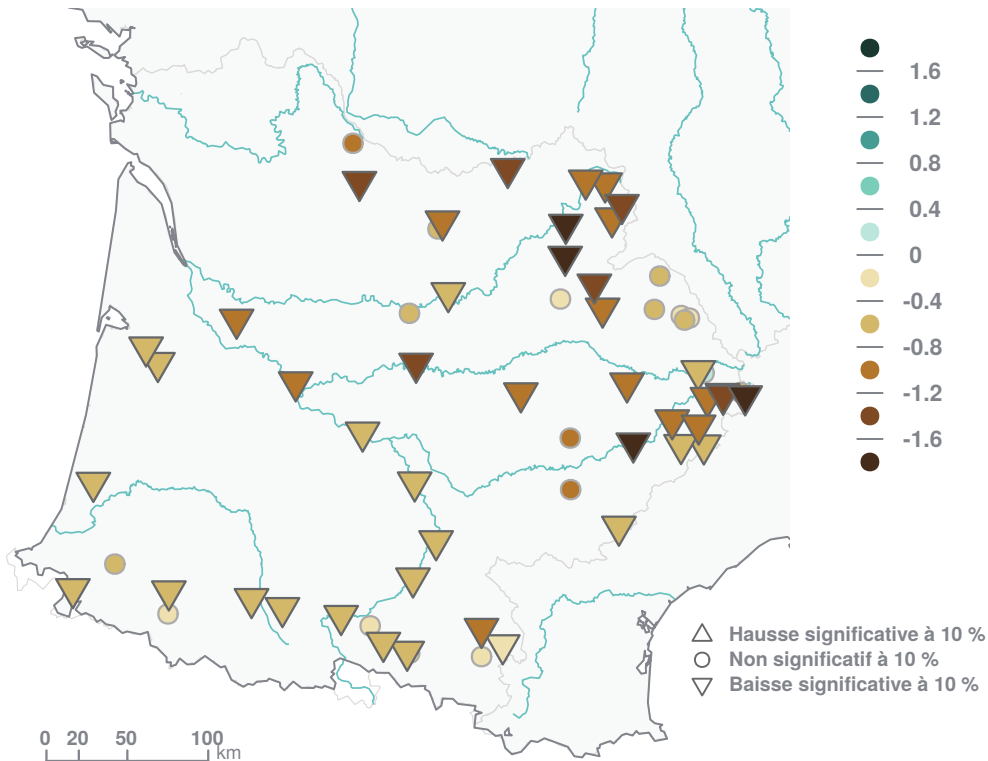


VCN10

Minimum annuel de la moyenne sur 10 jours du débit journalier

Tendances en $\%. \text{an}^{-1}$

Période du 01/01/1968 au 31/12/2022

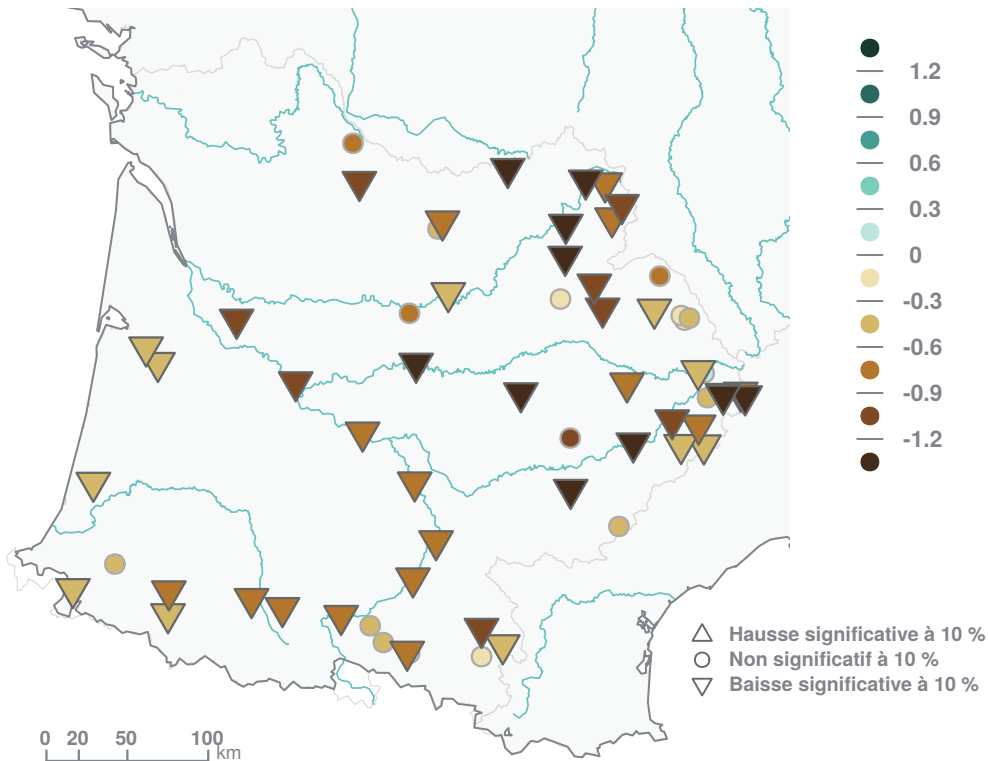


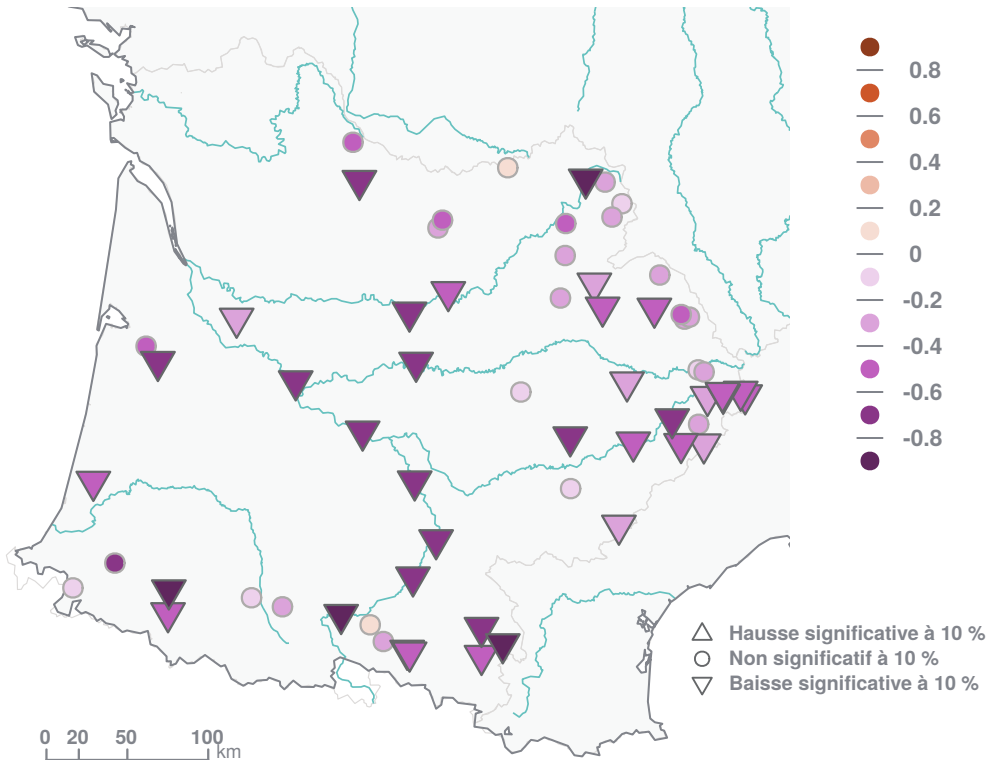
VCN30

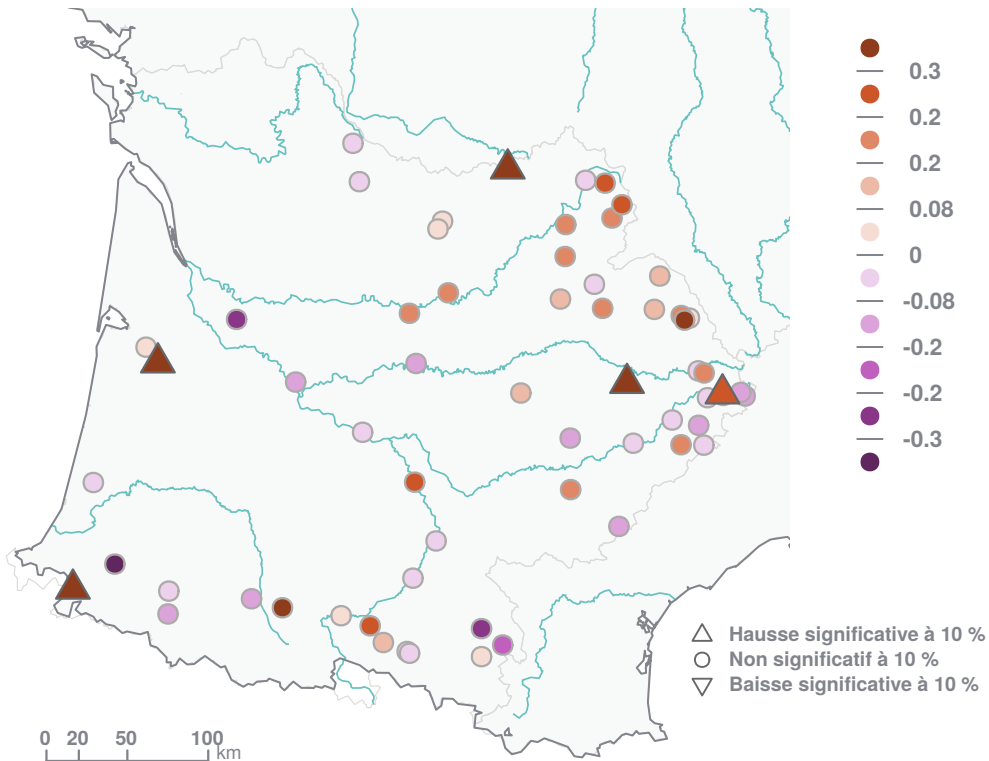
Minimum annuel de la moyenne sur 30 jours du débit journalier

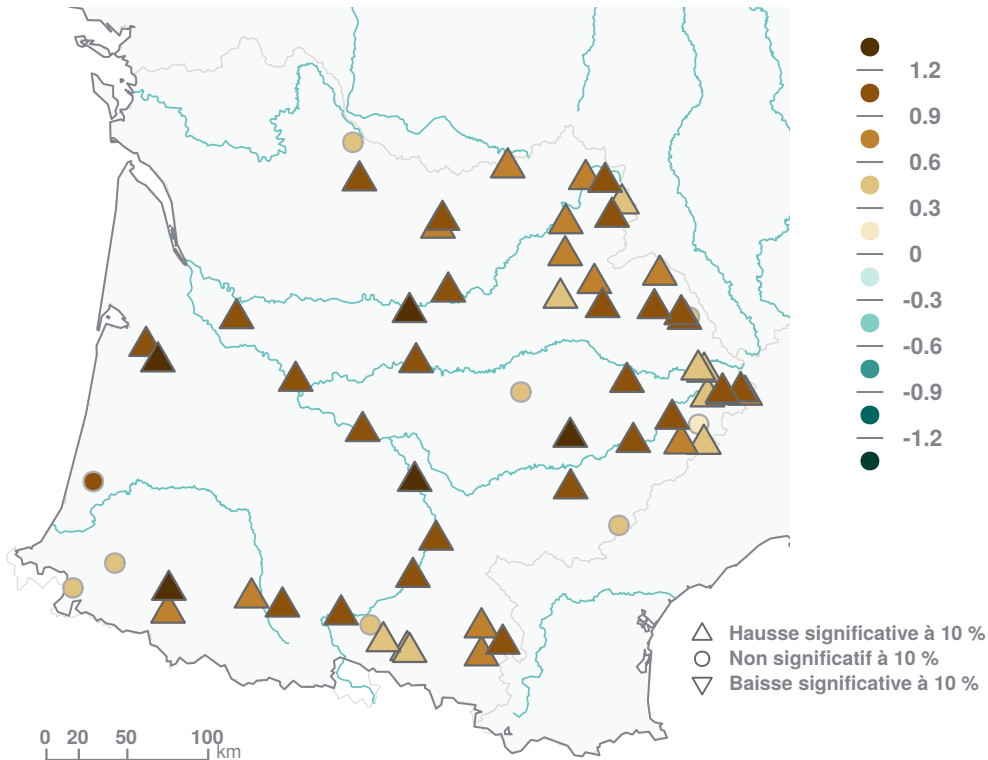
Tendances en $\%. \text{an}^{-1}$

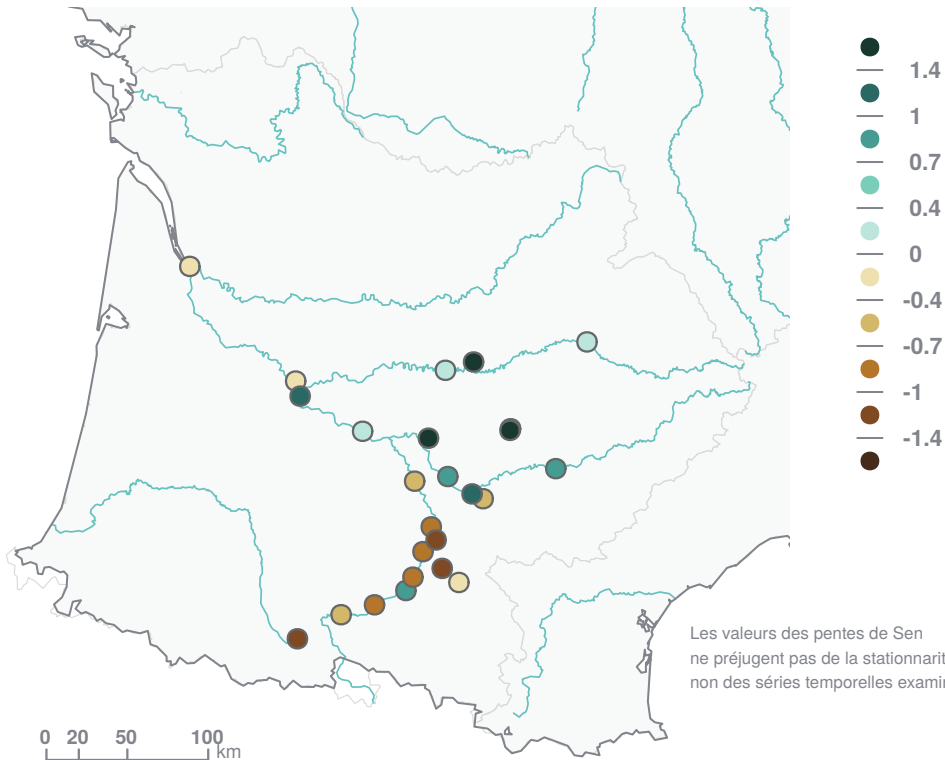
Période du 01/01/1968 au 31/12/2022











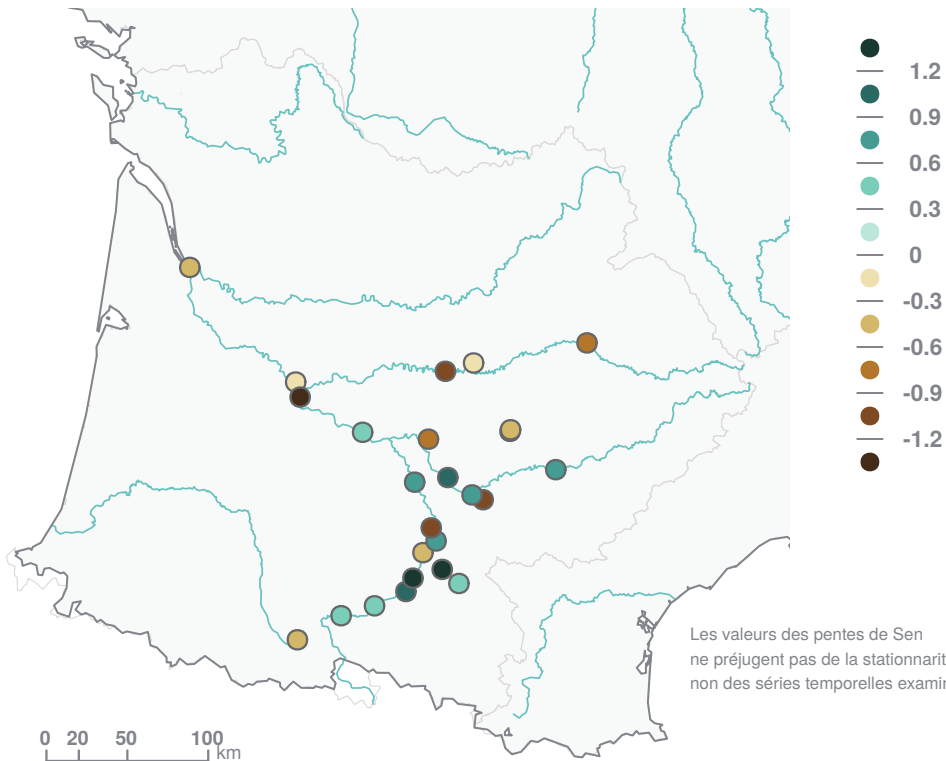
Les valeurs des pentes de Sen ne préjugent pas de la stationnarité ou non des séries temporelles examinées.

QMNA

Minimum annuel des débits mensuels

Tendances en $\% \cdot \text{an}^{-1}$

Période du 01/01/2003 au 31/12/2022



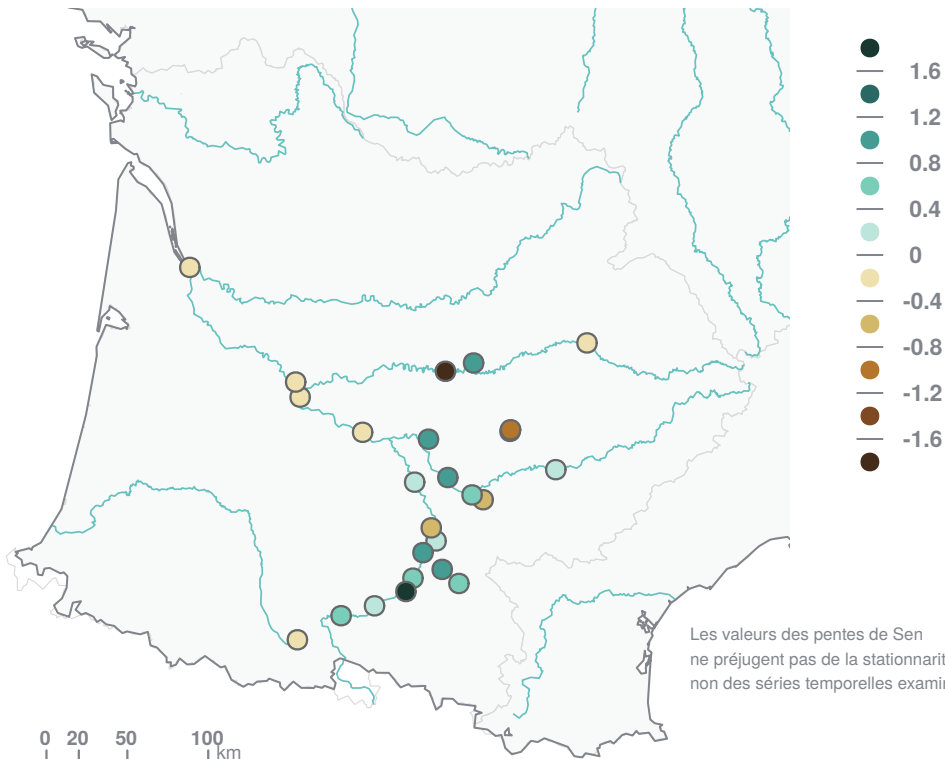
Les valeurs des pentes de Sen ne préjugent pas de la stationnarité ou non des séries temporelles examinées.

VCN10

Minimum annuel de la moyenne sur 10 jours du débit journalier

Tendances en $\%. \text{an}^{-1}$

Période du 01/01/2003 au 31/12/2022



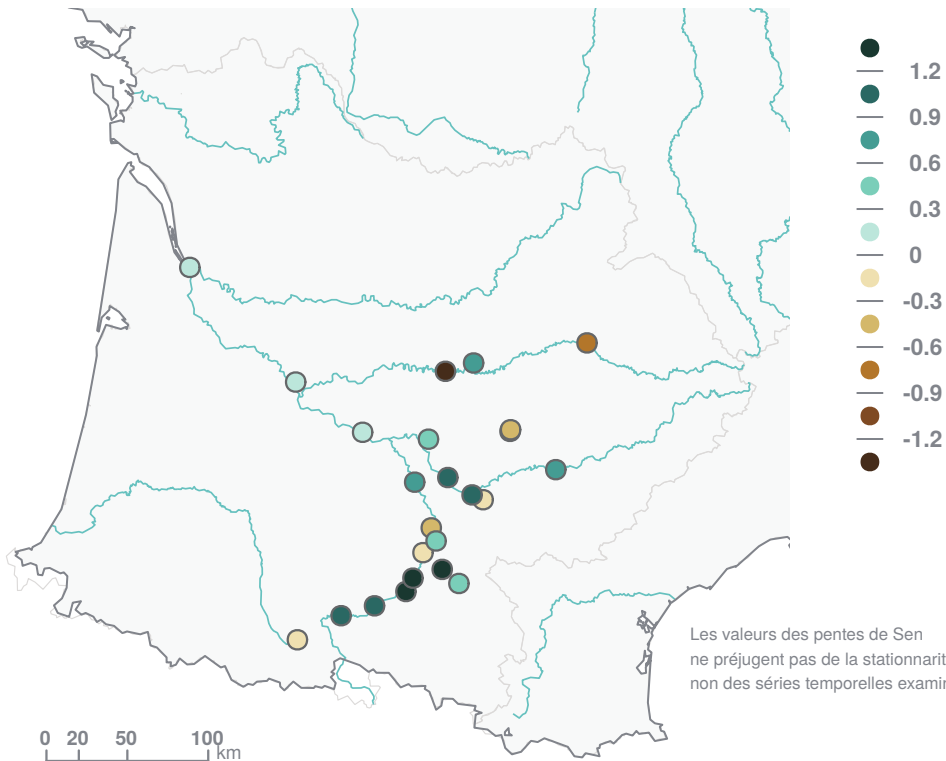
Les valeurs des pentes de Sen ne préjugent pas de la stationnarité ou non des séries temporelles examinées.

VCN30

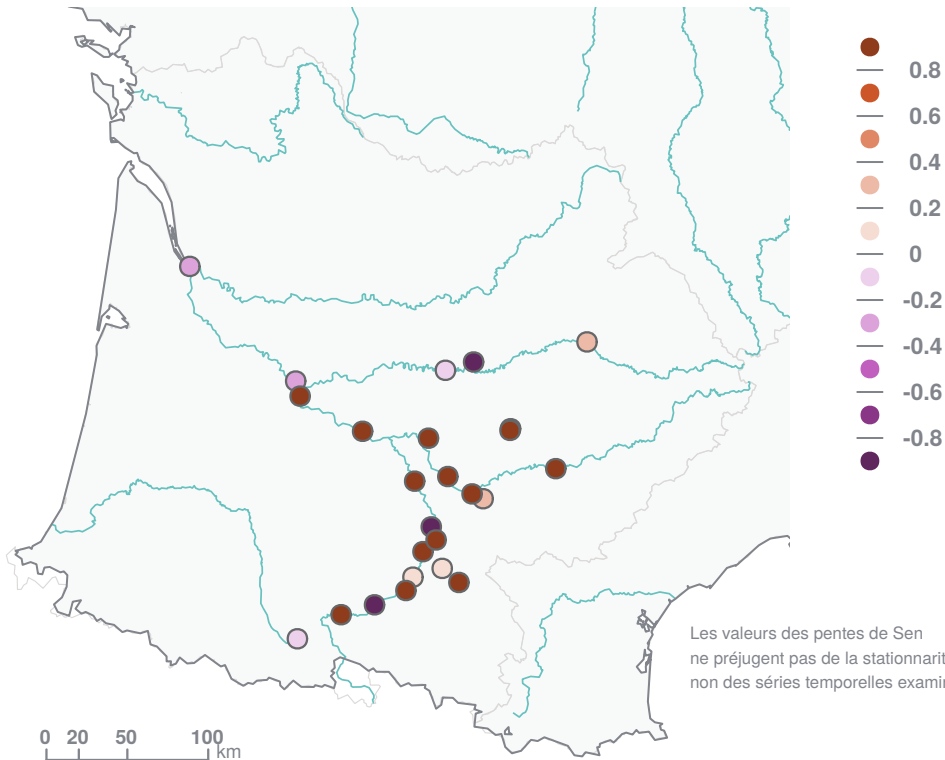
Minimum annuel de la moyenne sur 30 jours du débit journalier

Tendances en $\%. \text{an}^{-1}$

Période du 01/01/2003 au 31/12/2022



Les valeurs des pentes de Sen ne préjugent pas de la stationnarité ou non des séries temporelles examinées.



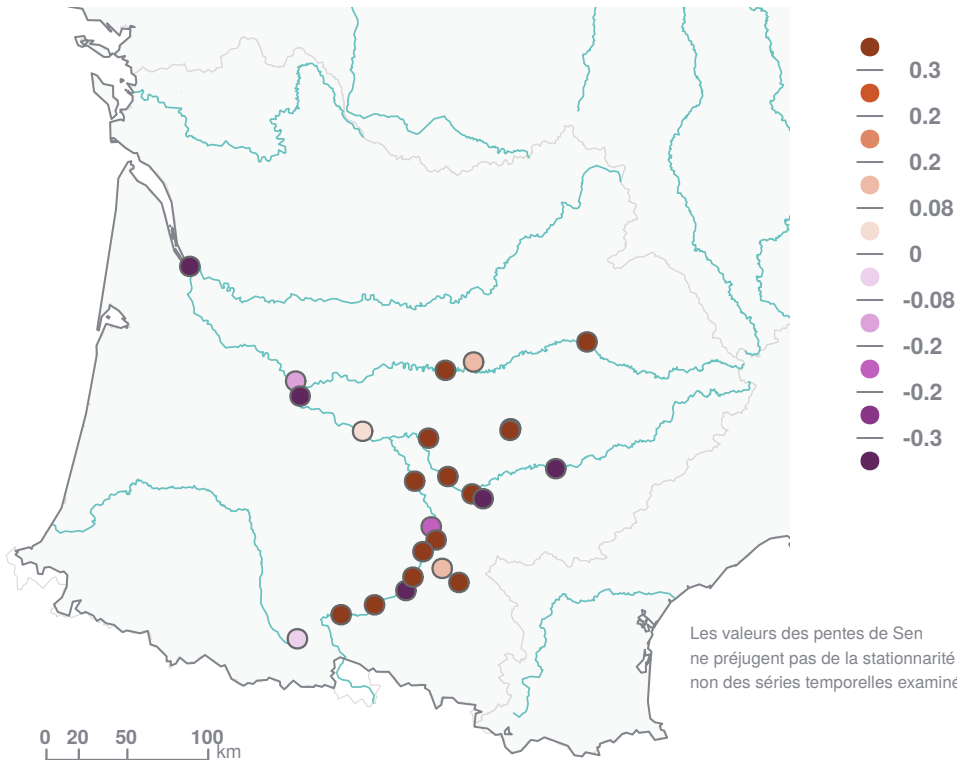
Les valeurs des pentes de Sen ne préjugent pas de la stationnarité ou non des séries temporelles examinées.

tVCN10

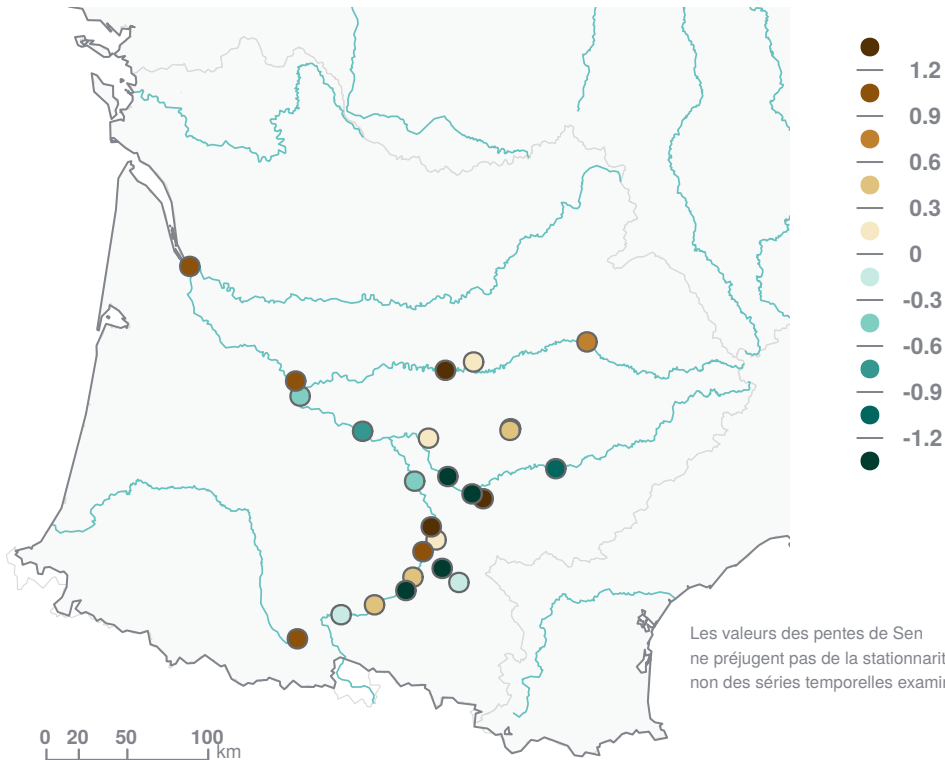
Centre des basses eaux

Tendances en jour.an⁻¹

Période du 01/01/2003 au 31/12/2022



Les valeurs des pentes de Sen ne préjugent pas de la stationnarité ou non des séries temporelles examinées.



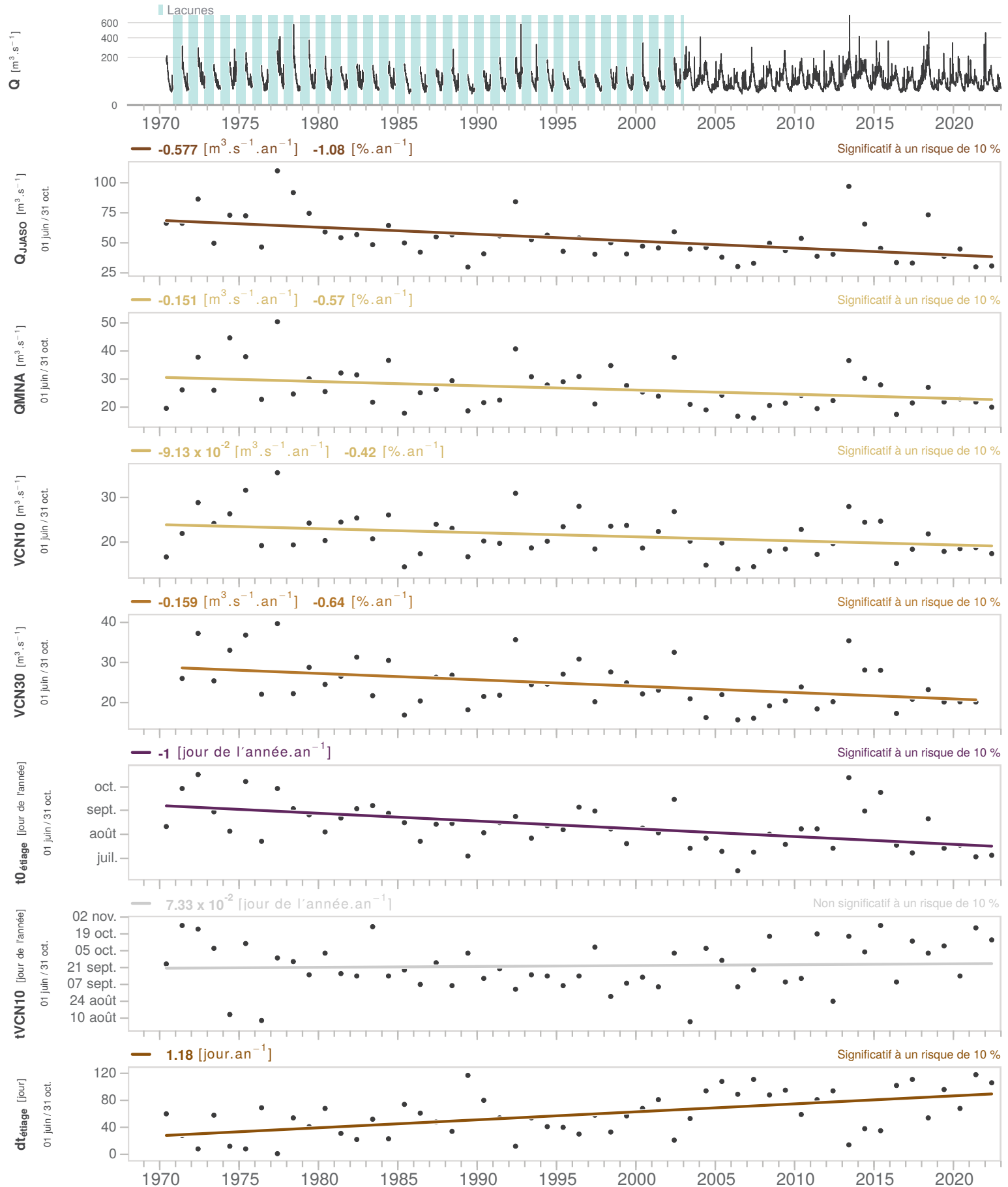
Les valeurs des pentes de Sen ne préjugent pas de la stationnarité ou non des séries temporelles examinées.

00200020 - La Garonne [partielle] à Saint-Gaudens [Valentine]

Débits reconstitués

Superficie : 2230 km²
 X = 513133 m (Lambert93)
 Y = 6224794 m (Lambert93)

Date de début : 01/06/1970
 Date de fin : 31/12/2022
 Disponibilité : 53 ans
 Taux de lacunes : 36 %

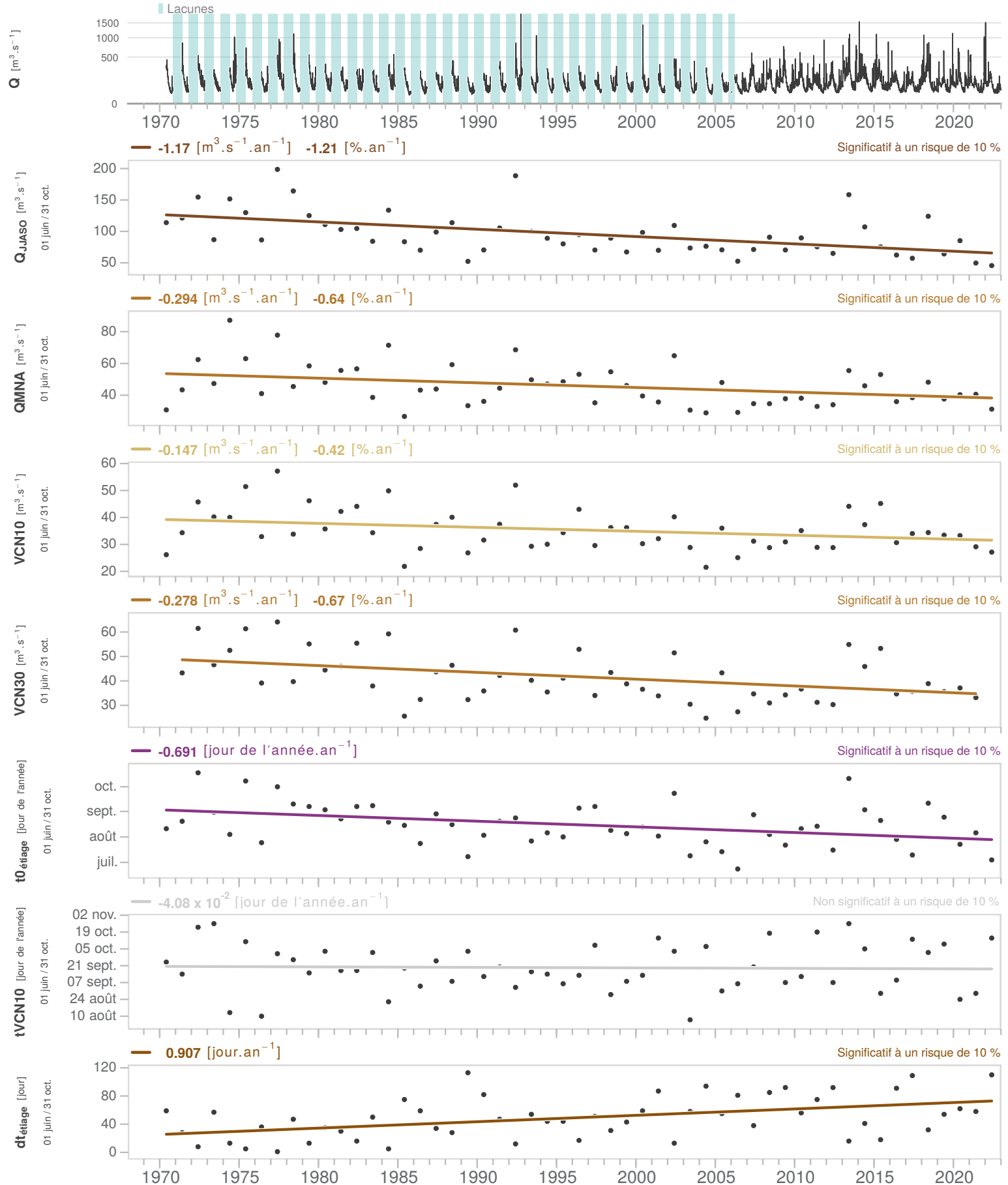
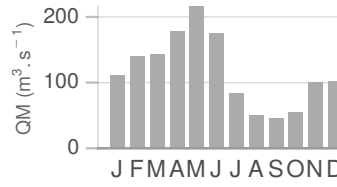


00800010 - La Garonne à Marquefave

Débits reconstitués

Superficie : 5243 km²
X = 557545 m (Lambert93)
Y = 6247996 m (Lambert93)

Date de début : 01/06/1970
Date de fin : 31/12/2022
Disponibilité : 53 ans
Taux de lacunes : 39 %

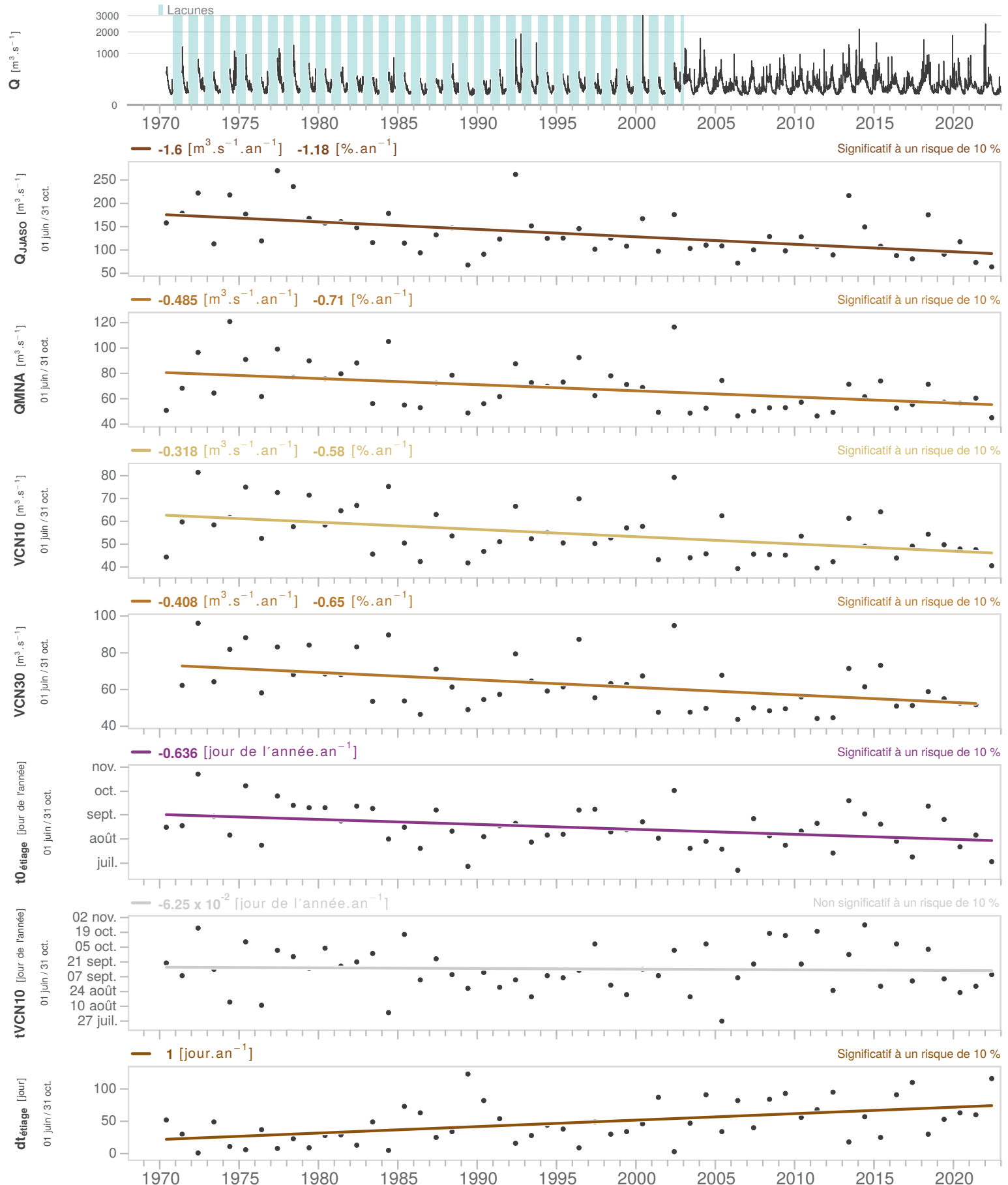
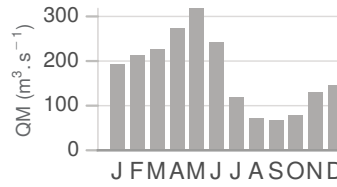


O2000010 - La Garonne à Portet-sur-Garonne

Débits reconstitués

Superficie : 9980 km²
 X = 571836 m (Lambert93)
 Y = 6270997 m (Lambert93)

Date de début : 02/01/1910
 Date de fin : 31/12/2022
 Disponibilité : 113 ans
 Taux de lacunes : 17 %

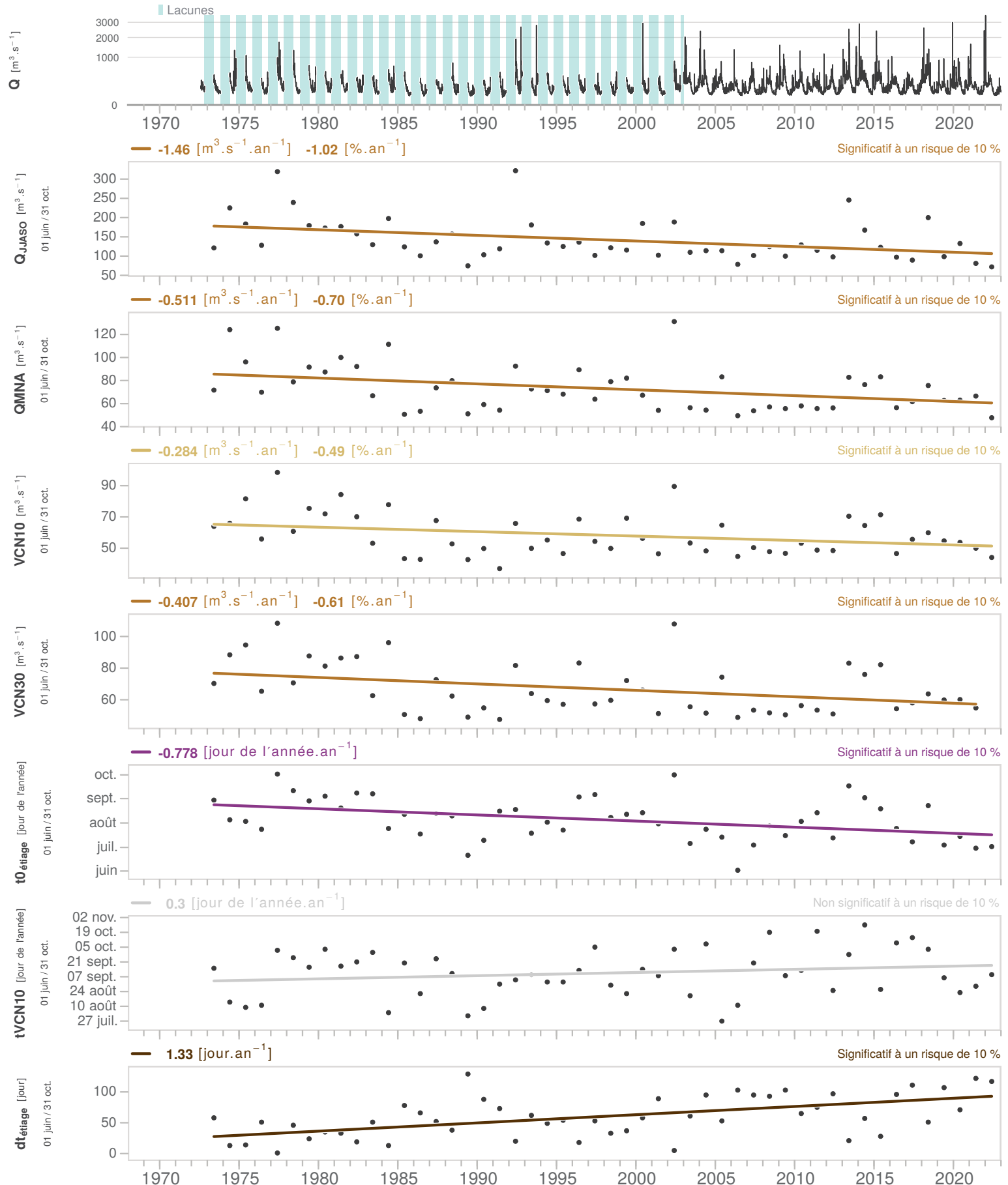
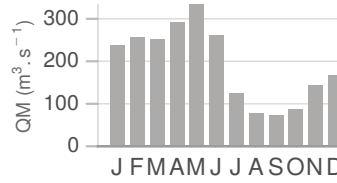


O2620020 - La Garonne à Verdun-sur-Garonne

Débits reconstitués

Superficie : 13730 km²
 X = 558607 m (Lambert93)
 Y = 6307329 m (Lambert93)

Date de début : 01/08/1972
 Date de fin : 31/12/2022
 Disponibilité : 50 ans
 Taux de lacunes : 35 %

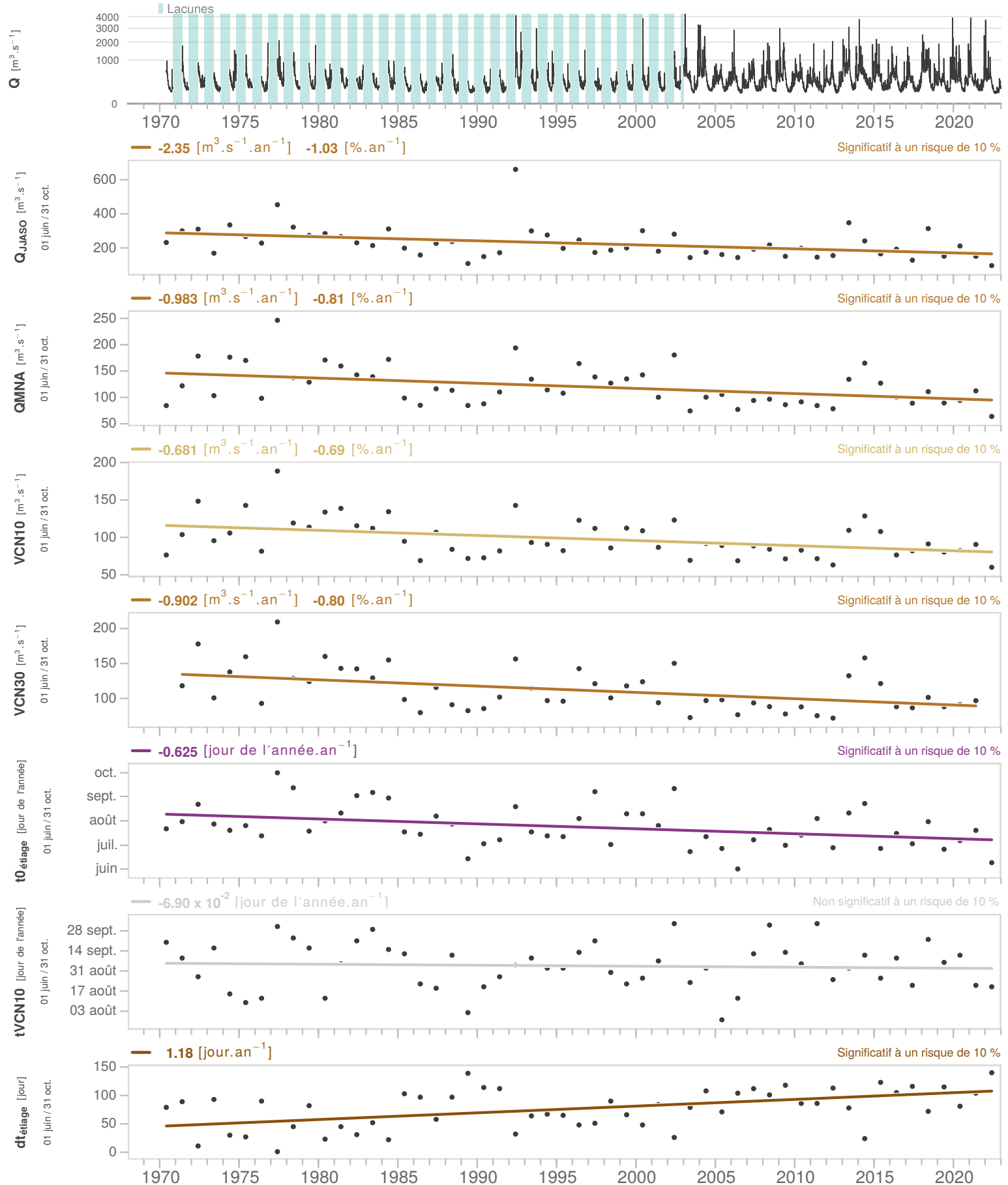


06140010 - La Garonne à Lamagistère

Débits reconstitués

Superficie : 32350 km²
 X = 526430 m (Lambert93)
 Y = 6338164 m (Lambert93)

Date de début : 07/12/1966
 Date de fin : 31/12/2022
 Disponibilité : 56 ans
 Taux de lacunes : 33 %

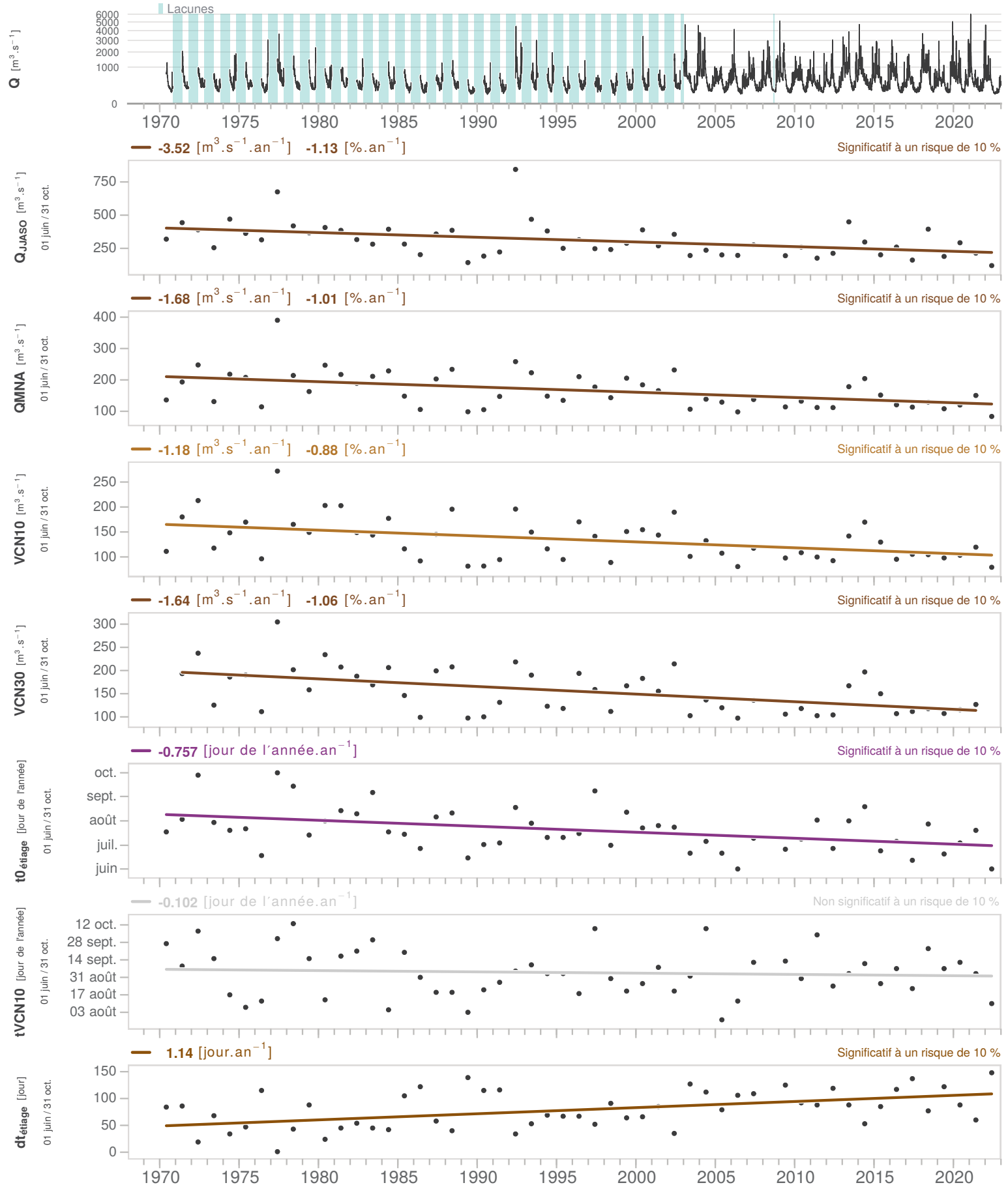
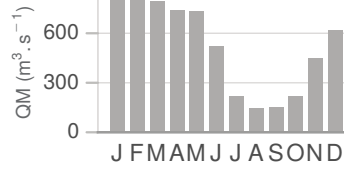


O9000010 - La Garonne au Mas-d'Agenais et à Tonneins

Débits reconstitués

Superficie : 50100 km²
 X = 485054 m (Lambert93)
 Y = 6369217 m (Lambert93)

Date de début : 01/06/1970
 Date de fin : 31/12/2022
 Disponibilité : 53 ans
 Taux de lacunes : 36 %

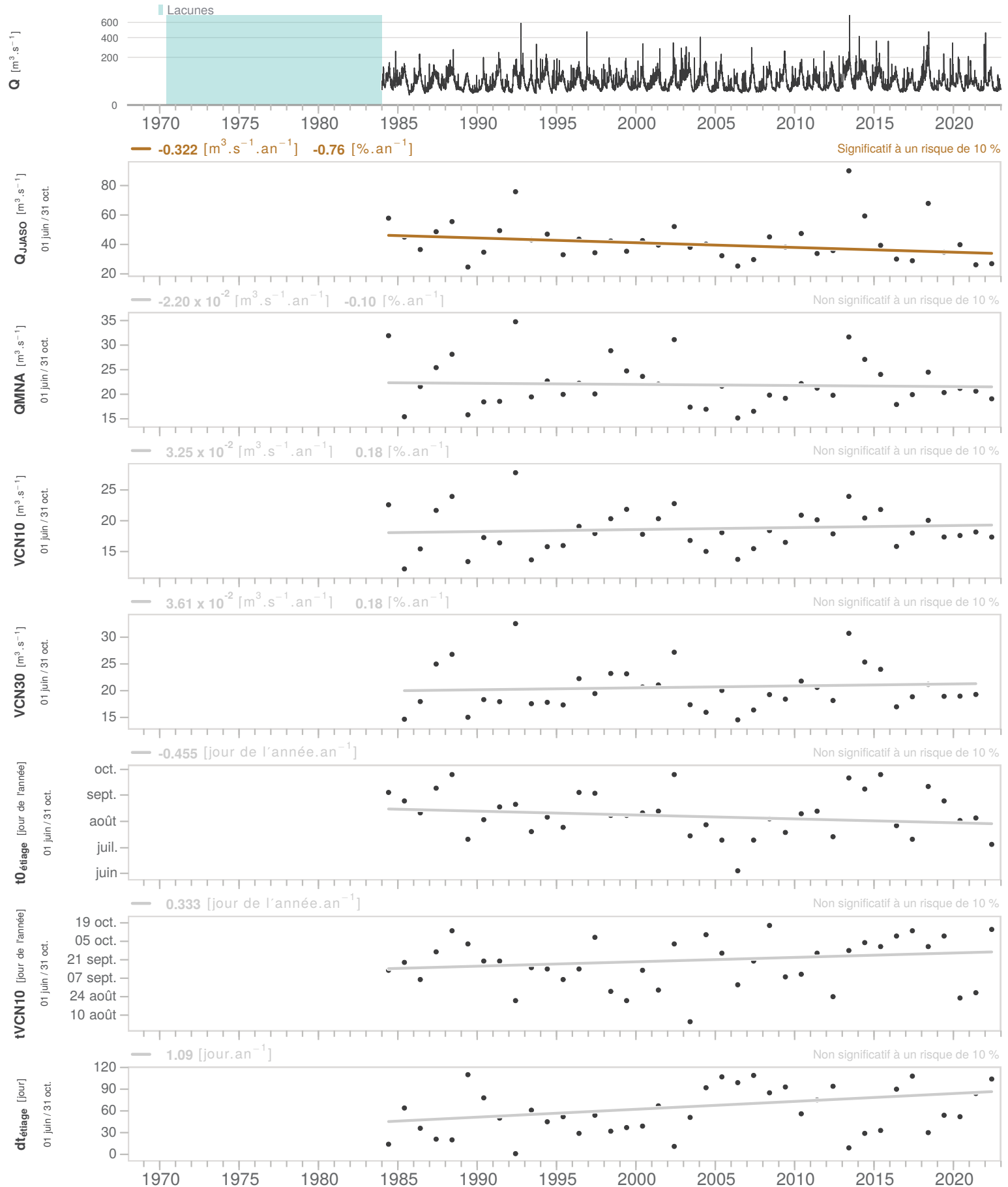
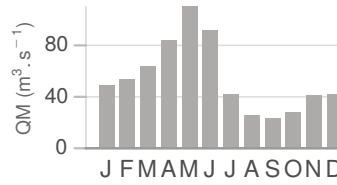


00200020 - La Garonne [partielle] à Saint-Gaudens [Valentine]

Débits influencés

Superficie : 2230 km²
 X = 513133 m (Lambert93)
 Y = 6224794 m (Lambert93)

Date de début : 01/06/1970
 Date de fin : 31/12/2022
 Disponibilité : 53 ans
 Taux de lacunes : 0 %

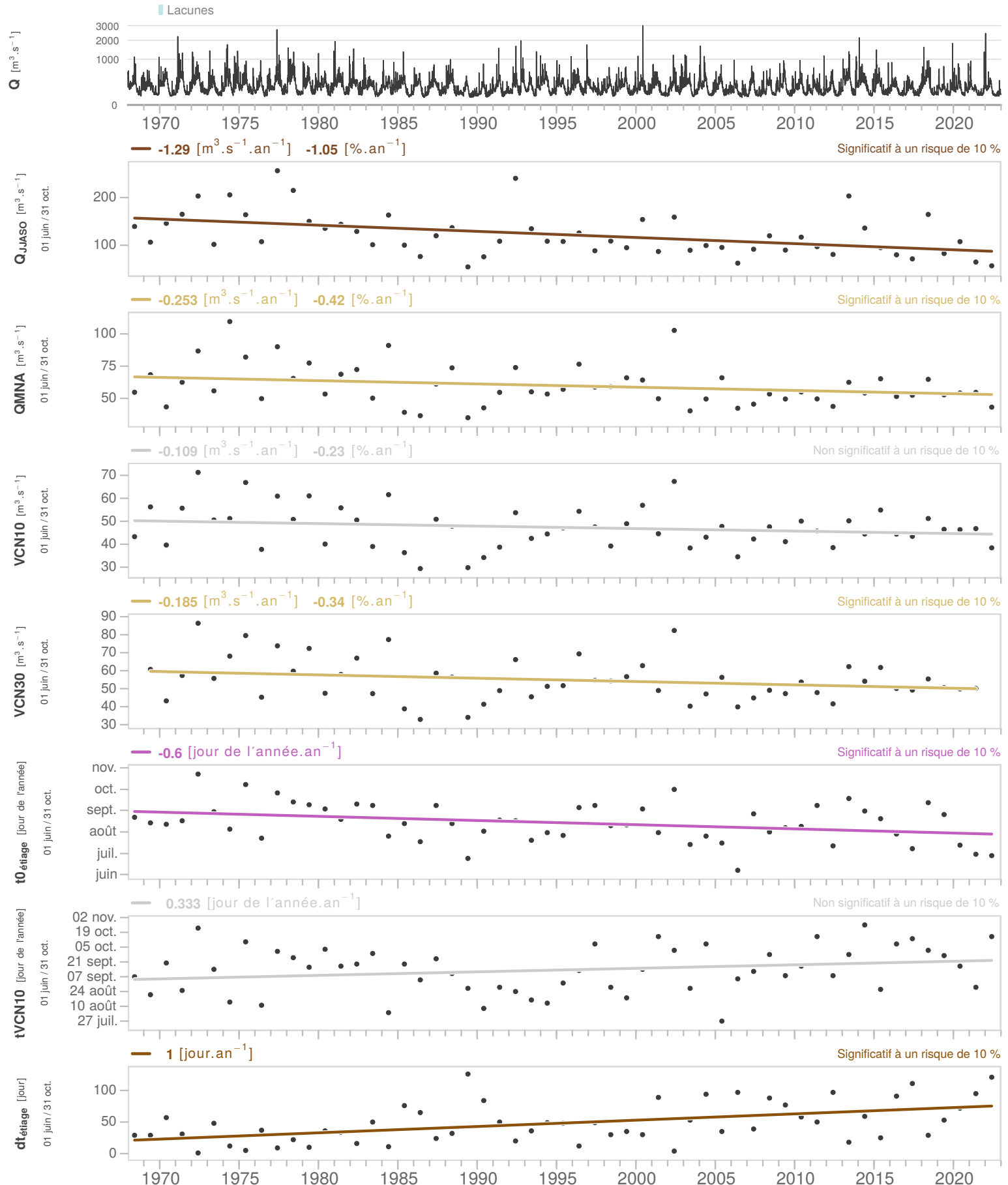
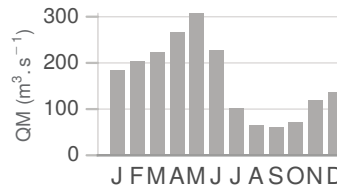


O2000010 - La Garonne à Portet-sur-Garonne

Débits influencés

Superficie : 9980 km²
 X = 571836 m (Lambert93)
 Y = 6270997 m (Lambert93)

Date de début : 02/01/1910
 Date de fin : 31/12/2022
 Disponibilité : 113 ans
 Taux de lacunes : 0 %

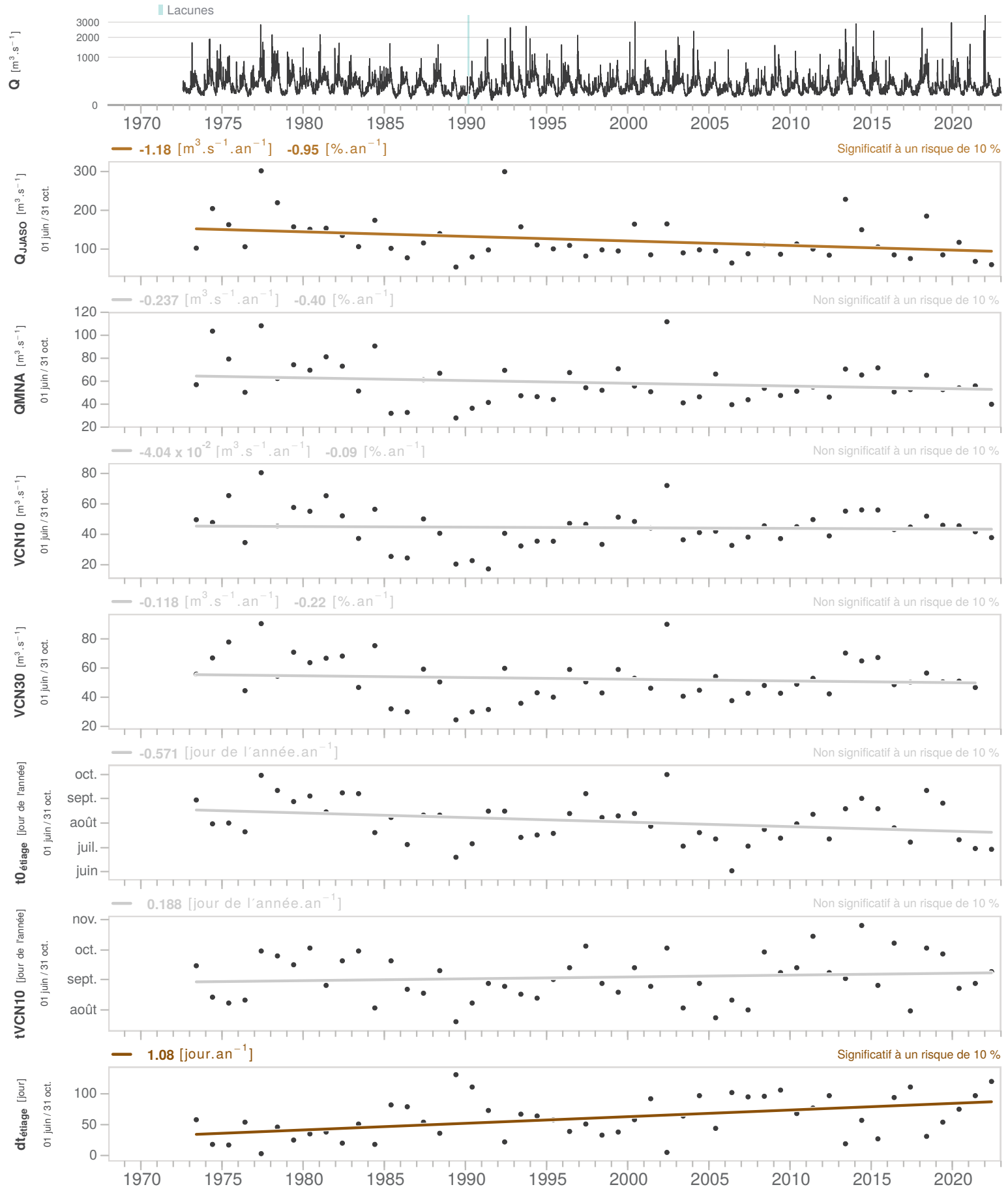
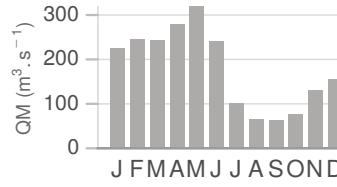


O2620020 - La Garonne à Verdun-sur-Garonne

Débits influencés

Superficie : 13730 km²
 X = 558607 m (Lambert93)
 Y = 6307329 m (Lambert93)

Date de début : 01/08/1972
 Date de fin : 31/12/2022
 Disponibilité : 50 ans
 Taux de lacunes : 0.22 %

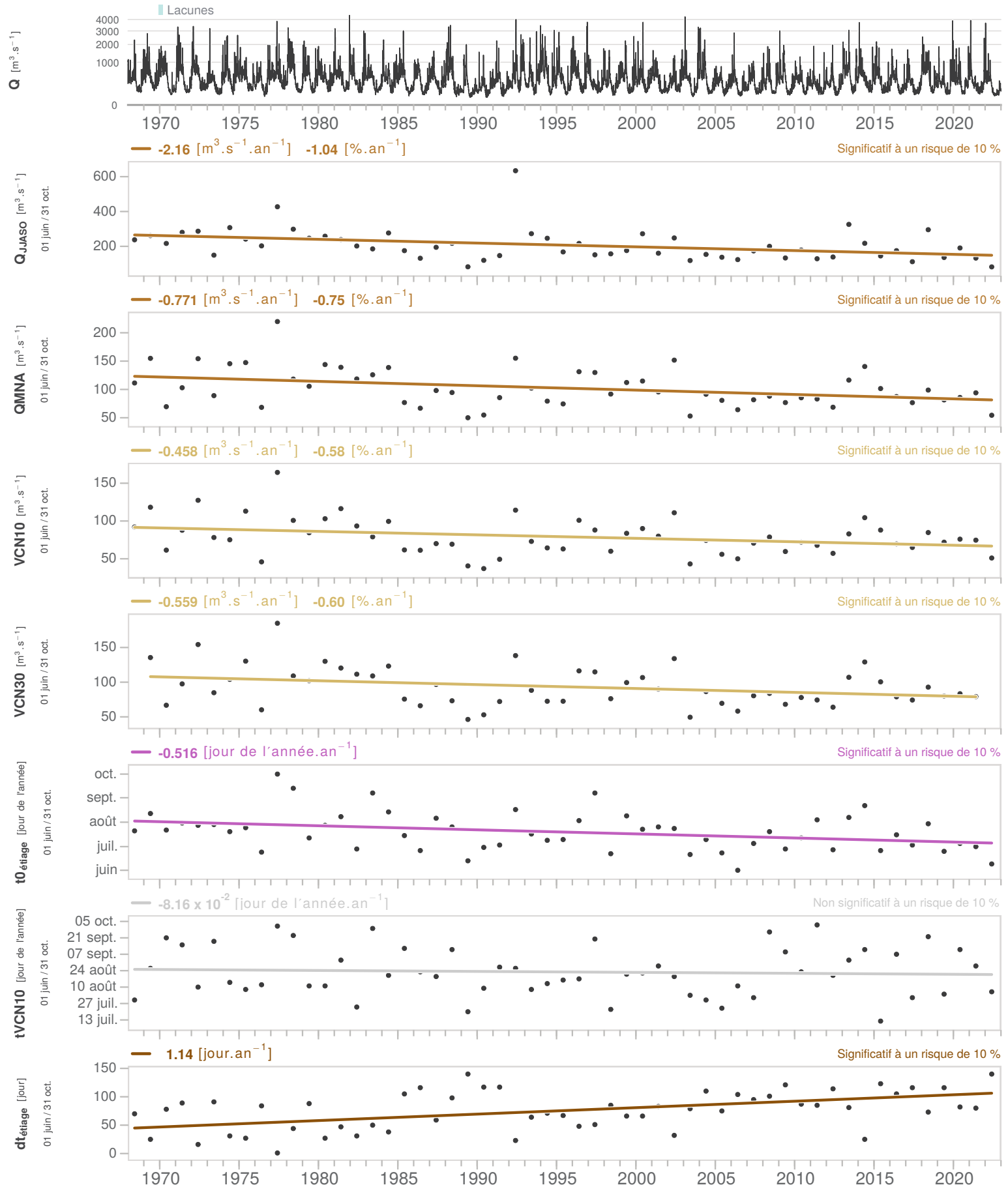


06140010 - La Garonne à Lamagistère

Débites influencés

Superficie : 32350 km²
 X = 526430 m (Lambert93)
 Y = 6338164 m (Lambert93)

Date de début : 07/12/1966
 Date de fin : 31/12/2022
 Disponibilité : 56 ans
 Taux de lacunes : 0 %





Centre Center Lyon-Grenoble - Auvergne-Rhône-Alpes
Adresse à préciser

Rejoignez-nous sur :



<https://www.inrae.fr/centres/lyon-grenoble-auvergne-rhone-alpes>