



**HAL**  
open science

## Cinquante ans de processus hydrologiques observés dans des petits bassins versants méditerranéens : vers une raréfaction de la ressource en eau ?

Nathalie Folton, Eric Martin, Patrick Arnaud, Mathieu Tolsa

### ► To cite this version:

Nathalie Folton, Eric Martin, Patrick Arnaud, Mathieu Tolsa. Cinquante ans de processus hydrologiques observés dans des petits bassins versants méditerranéens : vers une raréfaction de la ressource en eau?. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, 2020, 5, pp.17-27. 10.1051/lhb/2020048 . hal-03161125

**HAL Id: hal-03161125**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03161125v1>**

Submitted on 5 Mar 2021

**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.



# Cinquante ans de processus hydrologiques observés dans des petits bassins versants méditerranéens : vers une raréfaction de la ressource en eau ?

Nathalie Folton, Éric Martin, Patrick Arnaud & Mathieu Tolsa

To cite this article: Nathalie Folton, Éric Martin, Patrick Arnaud & Mathieu Tolsa (2020) Cinquante ans de processus hydrologiques observés dans des petits bassins versants méditerranéens : vers une raréfaction de la ressource en eau?, La Houille Blanche, 106:5, 17-27, DOI: [10.1051/lhb/2020048](https://doi.org/10.1051/lhb/2020048)

To link to this article: <https://doi.org/10.1051/lhb/2020048>



© Société Hydrotechnique de France, 2020



Published online: 21 May 2021.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 4



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)

## Cinquante ans de processus hydrologiques observés dans des petits bassins versants méditerranéens : vers une raréfaction de la ressource en eau ?

Nathalie Folton\*, Éric Martin, Patrick Arnaud et Mathieu Tolsa

INRAE, Aix Marseille Univ, RECOVER, Aix-en-Provence, France

Reçu le 19 mars 2020 / Accepté le 19 octobre 2020

**Résumé** – L'observatoire hydrologique du Réal Collobrier situé dans le sud-est de la France à proximité du littoral méditerranéen (massif des Maures) et géré par Irstea depuis 1966, constitue un site de référence en hydro-climatologie régionale. En raison du réseau dense de mesures des pluies et des débits, ce site offre une occasion unique d'évaluer les tendances hydrométéorologiques méditerranéennes à long terme. La végétation est composée de forêts principalement calcifuges sur des sols cristallins (maquis de bruyère, chêne-liège, pin maritime et châtaignier). L'influence humaine directe a été négligeable au cours des 50 dernières années. L'occupation du sol est demeurée presque inchangée, à l'exception notable d'un incendie de forêt en 1990 qui a touché un petit sous-bassin hydrographique. Par conséquent, les changements dans la réponse hydrologique des bassins versants sont causés par des changements dans les conditions climatiques et/ou physiques. Cette étude examine les changements sur la période d'observation de 50 ans, à l'aide de séries de précipitations et de débits. L'analyse utilise plusieurs indices climatiques décrivant des modes de variabilité distincts, à des échelles de temps interannuelles et saisonnières. Des indices hydrologiques décrivant les épisodes de sécheresse, en particulier en termes de durée et de sévérité sont également utilisés. Les tendances sont évaluées à l'aide du test statistique de Mann-Kendall. L'analyse montre qu'il existe une tendance marquée à la diminution des ressources en eau du bassin versant en réponse aux tendances climatiques, avec une augmentation de la sévérité et de la durée de la sécheresse. Mais les changements sont variables d'un sous-bassin à l'autre en fonction de leur propre fonctionnement hydrologique.

**Mots clés** : analyse de tendances / données hydro-climatiques / bassins versants méditerranéens / observatoire hydrologique

**Abstract** – **Fifty years of hydrological processes observed in small Mediterranean catchments: towards a scarcity of water resources?** The Réal Collobrier hydrological observatory in southeastern France close to the Mediterranean coast, managed by Irstea since 1966, constitutes a benchmark site for regional hydro-climatology. Because of the dense network of stream gauges and rain gauges available, this site provides a unique opportunity to evaluate long term hydro-meteorological Mediterranean trends. The vegetation is composed of forest mainly calcified on crystalline soils (maquis of heath, cork-oak, maritime pine and chestnut). Direct human influence has been negligible over the past 50 years. The land use/land cover has remained almost unchanged, with the notable exception of a wildfire in 1990 that impacted a small sub-catchment. Therefore changes in the hydrological response of the catchments are caused by changes in climate and/or physical conditions. This study investigates changes in observational data using up to 50-year daily series of precipitation and streamflow. The analysis used several climate indices describing distinct modes of variability, at inter-annual and seasonal time scales. Trends were assessed by the Mann-Kendall test. The analysis also used hydrological indices describing drought events based on daily data for a description of low flows, in particular in terms of timing and severity. The analysis shows that there is a marked tendency towards a decrease in the water resources of the Réal Collobrier catchment in response to climate trends, with an increase in drought severity and duration. But the changes are variable among the sub-catchments according to their own hydrological functioning.

**Keywords:** trend analysis / hydro-climatic data / mediterranean catchments / hydrological observatory

\*Correspondance : [nathalie.folton@inrae.fr](mailto:nathalie.folton@inrae.fr)

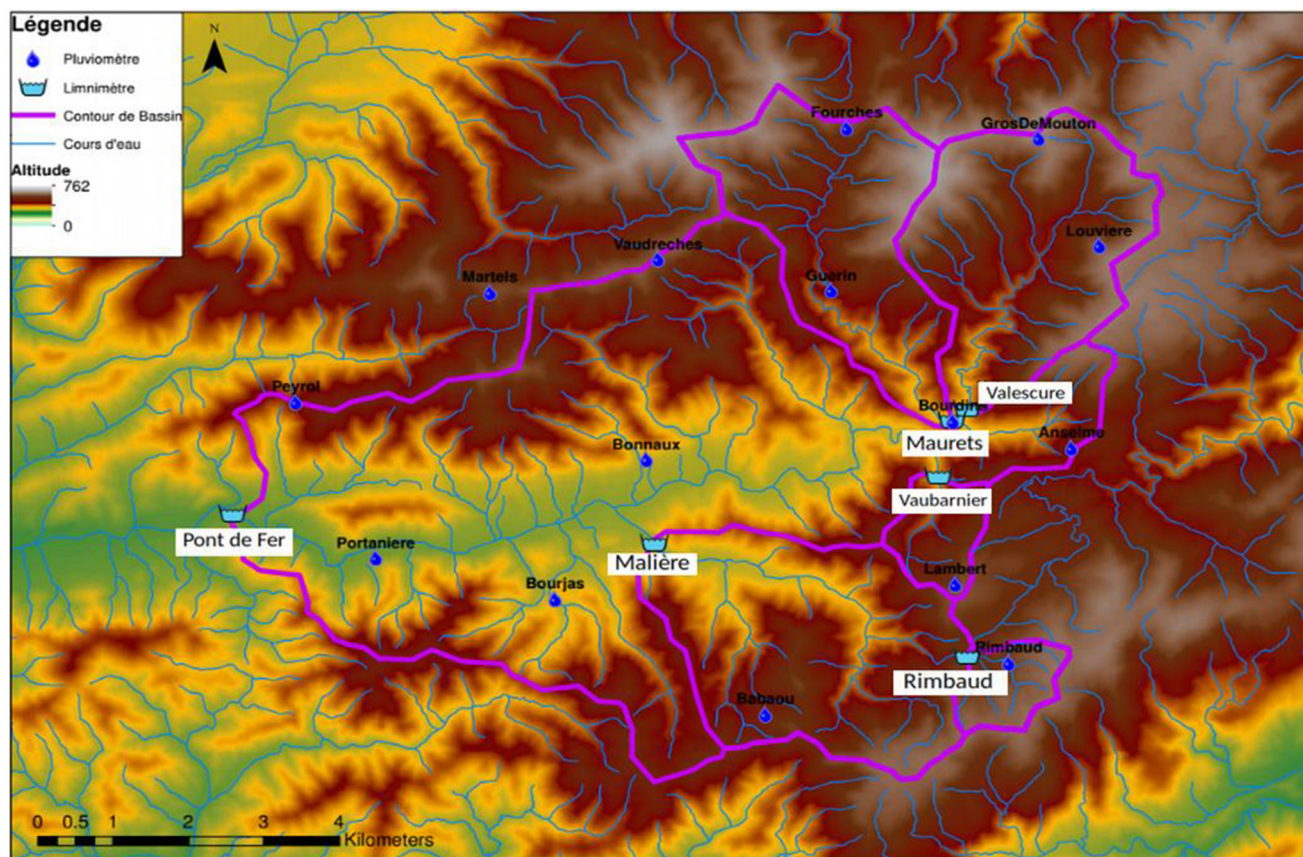


Fig. 1. Carte des sous bassins versants étudiés.

## 1 Introduction

Le climat méditerranéen est connu pour ses étés chauds et secs et ses fortes précipitations, principalement en automne. Ainsi, la variabilité du climat est plus élevée dans cette région que dans les régions voisines. Dans le contexte du changement climatique en cours, plusieurs études ont tenté de détecter des tendances dans les variables hydrologiques. [Chaouche \*et al.\* \(2010\)](#) ont étudié les tendances dans la partie occidentale de la région méditerranéenne sur la période 1970–2006. Ils ont principalement constaté une augmentation annuelle de la température et de l'évapotranspiration potentielle (ETP), alors qu'aucune tendance significative n'a été détectée pour les précipitations annuelles. Plusieurs études ont porté sur l'évolution des extrêmes de précipitations dans la région ([Pujol \*et al.\*, 2007](#) ; [Tramblay \*et al.\*, 2013](#) ; [Ribes \*et al.\*, 2018](#)). Elles ont conclu qu'il y avait eu une intensification significative des événements de précipitations extrêmes à l'échelle régionale, alors qu'à l'échelle locale l'évolution était très variable. [Hertig et Tramblay \(2017\)](#) ont constaté une augmentation généralisée des sécheresses météorologiques dans tout le bassin méditerranéen pour la période 1970–2000. [Lespinas \*et al.\* \(2010\)](#) ont suggéré que l'évolution des eaux souterraines a un impact significatif sur les tendances et la dynamique de la sécheresse dans la région.

Le bassin versant du Réal Collobrier, situé dans le sud-est de la France, à 50 km de la mer, a été instrumenté dans les

années 1960 afin d'améliorer la connaissance du cycle hydrologique et de son impact sur l'agriculture. L'ensemble du bassin versant et plusieurs sous-bassins versants font maintenant l'objet d'une surveillance depuis 50 ans, comprenant les précipitations et les débits. L'étude des processus hydrologiques à partir des mesures de terrain est particulièrement importante comme le préconise [Burt et McDonnell \(2015\)](#). La continuité des mesures est notamment un enjeu primordial à un moment où le travail de terrain est devenu plus coûteux et plus risqué par rapport aux approches par modèles ([Kirkby, 2004](#)). La mesure à long terme des données hydrologiques est unique pour calibrer, valider les modèles hydrologiques, mais aussi afin de mieux comprendre les processus, d'observer les tendances et tester de nouvelles idées, méthodes et instruments. L'objectif de l'étude est d'analyser les tendances hydrologiques sur ce bassin versant à partir des données observées, y compris les précipitations extrêmes et les sécheresses, et de mieux comprendre les mécanismes de la sécheresse. Tout d'abord, les caractéristiques physiques du bassin versant, les données associées ainsi que les méthodes utilisées sont décrites. Ensuite, les tendances des précipitations annuelles et mensuelles sont analysées. Enfin, nous discutons de l'évolution sur 50 ans des principales caractéristiques hydrologiques et des changements dans les processus hydrologiques qui se produisent dans le bassin versant, en relation avec le contexte plus large de la Méditerranée.

**Tableau 1.** Caractéristiques principales des bassins.

Bassin	S	Z	Nb	PA	LA	CE
Pont de Fer	70,4	335	14	993	271	0,27
Malière	12,4	386	3	999	334	0,33
Maurets	8,5	453	3	1059	314	0,30
Valescure	9,2	466	2	1164	420	0,36
Vaubarnier	1,49	391	1	1039	392	0,38
Rimbaud	1,53	549	0	1099	629	0,57

S : surface en km<sup>2</sup> ; Z : altitude moyenne en m ; Nb : nombre de pluviomètres ; PA : pluie annuelle en mm ; LA : écoulement annuel en mm ; CE : coefficient d'écoulement (LA/PA).

## 2 Description des bassins versants et des données

### 2.1 Description générale

Le bassin versant de recherche du Réal Collobrier est situé à l'extrémité ouest de la chaîne des Maures, sur la côte méditerranéenne française. Sa superficie est de 70 km<sup>2</sup>, avec une longueur maximale de 16 km et une largeur maximale de 9,6 km (Fig. 1). Son altitude varie de 70 m (à l'aval à l'extrémité ouest) à 780 m (au nord-est du bassin versant). L'altitude moyenne est de 335 m.

Ce bassin versant est composé de massifs métamorphiques et granitiques. L'axe hydrographique principal est aligné avec la grande faille Est-Ouest de Collobrières et les affluents du Réal Collobrier sont orientés NW-SE, perpendiculairement à la direction des roches. On observe différents faciès métamorphiques, d'ouest en est : micaschistes, amphibolites, phyllades et gneiss. Les versants ont un profil rectiligne et une pente forte. Les vallées, sauf celle du Réal Collobrier ont un indice d'ouverture faible. La perméabilité est généralement assez faible et l'approvisionnement en eau souterraine est extrêmement limité. Les aquifères de cette zone cristalline alimentent peu les affluents du Réal Collobrier qui s'assèchent rapidement en été. Le climat est de type méditerranéen humide, l'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle calculée à partir de la formule de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) sur les données de la station climatologique régionale de Toulon (Météo-France) de 1959 à 2014 est de 1290 mm par an (le minimum est de 1100 mm/an et le maximum est de 1327 mm/an) et la température de l'air annuelle moyenne est de 14,7 °C à la station climatologique de référence du Cannet des Maures de 1959 à 2011 (station du réseau des données homogénéisées de Météo-France).

Le couvert forestier domine largement les zones à flanc de colline. Les sous-bassins amont présentent donc une couverture végétale densément boisée composée de la plupart des espèces méditerranéennes calcifuges : chênes-lièges, chênes verts, bruyères, arbousiers, cistes et châtaigniers. La garrigue occupe des terres avec une mince couche de sol. L'épaisseur du sol varie de la mince couche de sol dans le petit bassin versant de Rimbaud (à l'est) au sol alluvial de plusieurs mètres d'épaisseur dans les basses vallées. Fortement escarpé dans sa partie amont, le bassin est relativement peu propice à l'installation humaine. Aussi, l'urbanisation du bassin versant est faible, à l'exception de la petite ville de Collobrières

(1200 habitants dans les années 1960, 2000 habitants aujourd'hui). Plusieurs sources de faible débit sont captées pour les besoins en eau potable de la commune, mais elles sont très sensibles aux phénomènes d'étiage. L'essentiel des besoins de la commune est donc assuré par des apports extérieurs au bassin versant hydrographique. La partie aval du bassin versant (en aval de Collobrières) est occupée par une grande plaine agricole plantée principalement de vignes (environ 10 % de la surface du bassin de Pont de Fer). En raison de la faible influence anthropique, le cycle hydrologique du bassin versant est très proche du cycle naturel. Le tableau 1 résume les principales caractéristiques du bassin versant et de ses sous-bassins.

### 2.2 Données météorologiques et hydrologiques

Les analyses ont été réalisées à l'échelle de l'ensemble du bassin versant (Pont de Fer) et de cinq sous-bassins. Six stations hydrologiques et quatorze pluviomètres ont été utilisés (voir Tab. 1). Les données disponibles ont été calculées à un pas de temps quotidien de janvier 1968 à décembre 2017. Les précipitations sont enregistrées sur des sites stables en termes de protocoles de mesure et de conditions d'observation (équipement approuvé, pas de déplacement de pluviomètres, et préservation des conditions du site). Les débits sont calculés à partir de mesures de la hauteur d'eau à l'aide d'un équipement hydrométrique (un flotteur). Les sections de contrôle sont construites dans une structure calibrée afin de ne pas être sujettes à changement (érosion, variations saisonnières dans la croissance des plantes aquatiques) et afin de réduire les incertitudes dans la relation entre le niveau de la rivière et son débit. Cet ensemble de données exceptionnelles a récemment été modernisé (installation de capteur de pression) et complété par de nouvelles mesures (températures de l'eau, paramètres physico-chimiques). Cet observatoire a été labellisé en 2015 en intégrant le Système d'observation et d'expérimentation (SOERE) du Réseau des Bassins Versants (RBV) et appartient actuellement à l'infrastructure de recherche des Observatoires de la Zone Critique, Applications et Recherches (OZCAR). L'ensemble des données produites sont disponibles et accessibles via la Base de Données des Observatoires en Hydrologie (BDOH) produite et gérée par Irstea (<https://doi.org/10.17180/obs.real>) (Tolsa *et al.*, 2015).

Afin d'avoir une idée globale de l'évolution des précipitations sur le bassin versant du Réal Collobrier, les tests ont été appliqués aux précipitations moyennes du bassin versant,

**Tableau 2.** Indices pluviométriques.

Type	Nom	Définition	Unité
Seuil	WD <sub>x</sub>	Nombre de jours humides ( $R > x$ )	jours
	INT <sub>x</sub>	Intensité moyenne durant les jours humides ( $R > x$ )	mm j <sup>-1</sup>
Durée	PRTOT <sub>x</sub>	Pluie annuelle des jours humides ( $R > x$ )	mm
	CWD <sub>x</sub>	Nombre maximum de jours consécutifs humides ( $R > x$ )	jour
	CDD <sub>x</sub>	Nombre maximum de jours consécutifs secs ( $R < x$ )	jour
	DSL <sub>x</sub>	Nombre moyen de jours consécutifs secs ( $R < x$ )	jour
Absolu	R1d,R3d,R5d	Pluie maximale annuelle sur 1 jour, 3 jours, et 5 jours	mm
	PA	Pluie annuelle	mm
	PM	Pluie mensuelle	mm

R représente la pluviométrie journalière et x représente le seuil de précipitations ( $x = 2, 5, 10, 20$  et  $30$  mm).

au risque de masquer d'éventuelles tendances à l'échelle des pluviomètres pris individuellement. L'interpolation spatiale des précipitations sur le bassin versant a été réalisée avec la méthode IDW (Inverse Distance Weighted Method, méthode de pondération par l'inverse distance), largement utilisée en interpolation des précipitations.

### 2.3 Caractéristiques hydrologiques du bassin versant et des sous-bassins versants

L'analyse du [tableau 1](#) permet une première comparaison entre les bassins versants. Le bassin versant de Pont de Fer est le bassin principal, alimenté par les autres sous-bassins. Pour l'analyse, nous avons comparé les bassins versants individuellement ou par groupes comme par exemple les bassins versants de Rimbaud et de Vaubarnier (deux petits bassins voisins, d'environ  $1,5 \text{ km}^2$ ); les bassins des Maurets et Valescure (deux bassins voisins, d'environ  $9 \text{ km}^2$ ); Malière et Rimbaud (Malière,  $12 \text{ km}^2$  recevant les débits du bassin de Rimbaud).

Les précipitations moyennes sont de  $993 \text{ mm/an}$  sur le bassin de Pont de Fer et varient entre  $428 \text{ mm}$  (en 2017) et  $1709 \text{ mm}$  (en 2014). En moyenne sur 50 ans, la variation spatiale des précipitations entre les sous-bassins versants est faible (entre  $993$  et  $1164 \text{ mm/an}$ , [Tab. 1](#)) mais peut être plus élevée à des échelles de temps inférieures. Le ruissellement annuel moyen à Pont de Fer est de  $271 \text{ mm/an}$ . Ce bassin reçoit la plus faible pluviométrie, et renvoie également la plus faible proportion de pluie (coefficient de ruissellement de  $0,27$ ).

Le cycle saisonnier des précipitations des bassins versants est typique d'un bassin versant méditerranéen. En général, pour tous les bassins versants, la période juin-août est très sèche, avec des précipitations inférieures à  $40 \text{ mm/mois}$  et des débits inférieurs à  $10 \text{ mm/mois}$ . Les précipitations augmentent en septembre, mais avec un impact très limité sur le débit. Octobre et novembre sont les mois les plus humides (environ  $130 \text{ mm/mois}$ ). La saison des pluies s'étend d'octobre à janvier, mais des précipitations abondantes peuvent survenir à tout moment, entre septembre et juin. Le débit n'est pas permanent et peut disparaître pendant la période sèche. Au début de l'année hydrologique, en septembre, les bassins versants ont besoin de fortes contributions pluviométriques pour relancer le régime de débit permanent.

## 3 Méthodes

Cette section décrit les principaux indices utilisés pour caractériser le régime hydrologique du bassin versant. Ces indices sont issus des séries chronologiques, sur lesquels des tests statistiques ont été appliqués pour déterminer les tendances.

### 3.1 Indices pluviométriques

Nous avons utilisé les indices hydroclimatiques recommandés par l'ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices) ([Peterson \*et al.\*, 2001](#)), dérivés des précipitations quotidiennes. Ces indices peuvent être divisés en trois catégories : indices de seuil, indices de durée et indices absolus. Le [tableau 2](#) fournit la description détaillée de ces indices. Dans ce tableau, «R» représente la pluviométrie journalière et «x» est un seuil de précipitations. Un jour est défini comme «sec» (respectivement humide) si les précipitations quotidiennes sont inférieures (respectivement supérieures) au seuil «x». Pour les journées les plus sèches, un seuil de  $2 \text{ mm}$  a été utilisé car ces faibles précipitations ne réduisent pas significativement le stress hydrique et sont immédiatement absorbées par la végétation (interception et évapotranspiration). Quatre seuils supplémentaires ont été utilisés ( $5, 10, 20$  et  $30 \text{ mm}$ ).

### 3.2 Indices hydrologiques

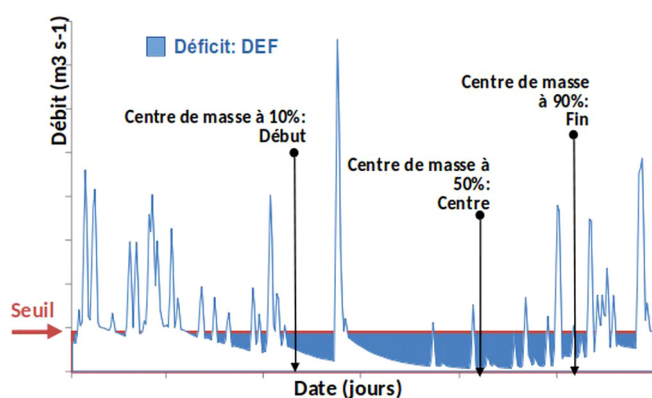
L'analyse de stationnarité des régimes hydrologiques a porté sur l'évolution des indices calculés à partir des débits journaliers, sur les six bassins versants du Réal Collobrier. Ces indices (voir [Tab. 3](#)) peuvent être divisés en quatre catégories : absolu, seuil, durée et faibles débits.

Les indices absolus sont les débits maximaux annuels, les débits moyens annuels et les débits moyens mensuels. Ces indices sont complétés par d'autres indices pour caractériser les divers aspects des épisodes de sécheresse hydrologique en fonction du débit journalier.

La caractérisation d'un épisode de sécheresse dépend habituellement de la définition d'un seuil de débit qui permet de caractériser la durée de la sécheresse (durée pendant laquelle

**Tableau 3.** Indices hydrologiques.

Type	Nom	Définition
Absolu	AMaxlj	Débit journalier maximal annuel (mm/j)
	QA	Débit annuel (mm/an)
	QM	Débit mensuel (mm/mois)
Seuil	DEF	Déficit de volume (Mm <sup>3</sup> )
	Durée	Durée de l'étiage (jours)
Durée	Début	Date de début de l'étiage (date)
	Centre	Date du centre de l'étiage (date)
	Fin	Date de fin de l'étiage (date)
	Base eaux	BFI Base Flow

**Fig. 2.** Définition des indices hydrologiques de sécheresse.

les débits sont inférieurs à ce seuil), le déficit volumique (écoulement pendant la durée de sécheresse) ou des indices similaires. Ce seuil est le plus souvent dérivé de la courbe des débits classés interannuelle. Il permet de caractériser la sévérité du débit d'étiage. Dans la présente étude, nous avons opté pour un seuil défini comme le quantile à 80% de la courbe des débits classés interannuelle, une valeur utilisée dans de nombreuses études sur les sécheresses. Ainsi les périodes ayant des valeurs inférieures à ce seuil choisi sont définies comme des périodes de sécheresse hydrologique.

La [figure 2](#) présente la méthodologie d'évaluation des indices hydrologiques de sécheresse calculés à partir de ce seuil et le [tableau 3](#) récapitule l'ensemble des indices hydrologiques utilisés.

Ces indices sont :

- Le déficit annuel en volume par rapport au seuil de faible débit (appelé « DEF ») ([Giuntoli et al., 2013](#)) : c'est le volume entre le seuil et les débits inférieurs au seuil ;
- Le nombre de jours par an où le débit est inférieur au seuil, correspond à la durée de l'étiage (DE) ;
- Le caractère saisonnier du faible débit a été étudié à l'aide du concept de centre de masse introduit par [Stewart et al. \(2005\)](#). Le centre de masse de x % est défini comme la date à laquelle x % du déficit de volume annuel a été écoulé. Les centres de masse de 10 %, 50 % et 90 % servent à définir le début (Début), le centre (Centre) et la fin (Fin) de la période d'étiage pour chaque année.

Le dernier indice caractérisant les faibles débits est le BFI (Base Flow Index – Indice d'écoulement de base). Nous avons utilisé cet indice pour caractériser la sensibilité aux étiages des bassins versants. Une valeur élevée du BFI reflète une contribution élevée des eaux souterraines au débit, alors que des valeurs faibles sont typiques des bassins versants ayant une faible influence des eaux souterraines sur le débit total. La courbe du débit de base a été estimée par un filtre numérique récursif suggéré par [Lyne et Hollick \(1979\)](#) via le package R EcoHydrology.

### 3.3 Méthodes d'analyse des tendances

Un test de détection de tendance indiquant une possible non-stationnarité a été appliqué à tous les indices. Nous avons utilisé un test de tendance non paramétrique qui nécessite que les données soient indépendantes, tandis que les tests de tendance paramétriques exigent l'hypothèse de données indépendantes et normalement distribuées. Le coefficient d'autocorrélation du premier ordre de la série temporelle a été calculé pour chaque série et un test a été appliqué pour détecter les autocorrélations significativement différentes de zéro (fonction « acf » du package R STATS).

Le test de Mann-Kendall (test MK) ([Kendall, 1975](#)) est un test non paramétrique basé sur les rangs d'observations plutôt que sur leurs valeurs. Il n'est pas affecté par la distribution des données et il est moins sensible aux valeurs singulières (horsains). Il est utilisé pour détecter les tendances significatives des variables climatiques. Dans cette étude, les niveaux de signification pour rejeter l'hypothèse nulle ( $H_0$  = aucune tendance) sont  $\alpha = 0,01, 0,05$  et  $0,1$ . La fonction « mk.test » du package R TREND a été utilisée ([Hipel et McLeod, 2005](#)). Le test de Mann-Kendall donne de mauvais résultats lorsque l'autocorrélation est élevée ([Yue et al., 2002](#) ; [Yue et Wang, 2004](#)). Des valeurs corrélées sont présentes dans les échantillons de débit annuel, de précipitations normalisées et de débits normalisés. Pour calculer la statistique MK dans les séries corrélées, [Hamed et Rao \(1998\)](#) ont donc modifié le test de Mann-Kendall par correction de variance. Ce test MK modifié a été appliqué aux séries de données pour lesquelles une autocorrélation significative a été détectée.

Le test de Mann-Kendall est associé au calcul de la pente de Sen ou de l'estimateur de Theil-Sen ([Theil, 1950](#) ; [Sen, 1968](#)). Cette méthode a été largement utilisée afin d'identifier la pente de la ligne de tendance dans une série chronologique

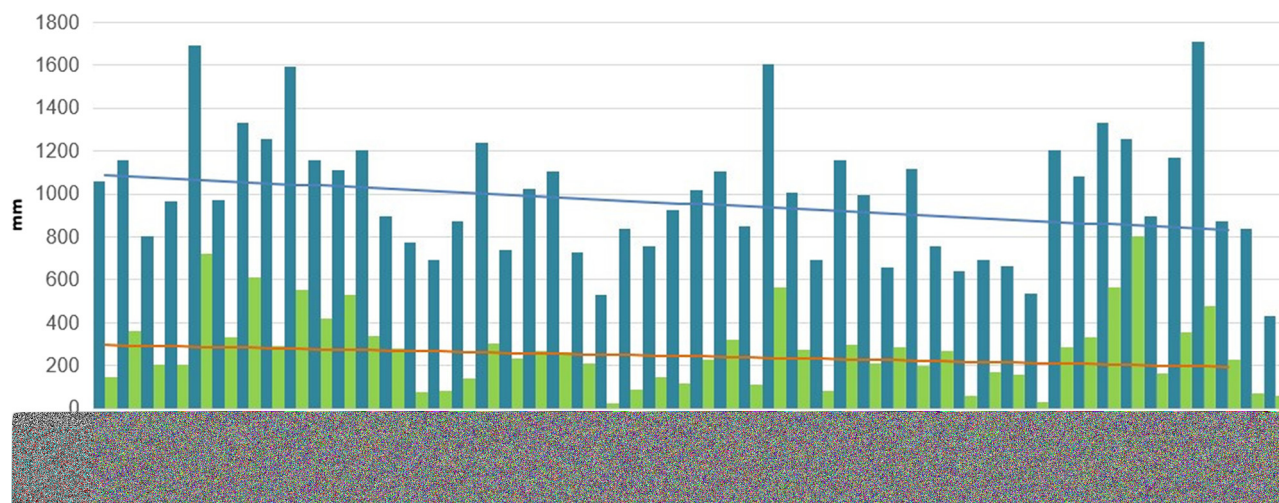


Fig. 3. Pluie et écoulement annuel à Pont de Fer.

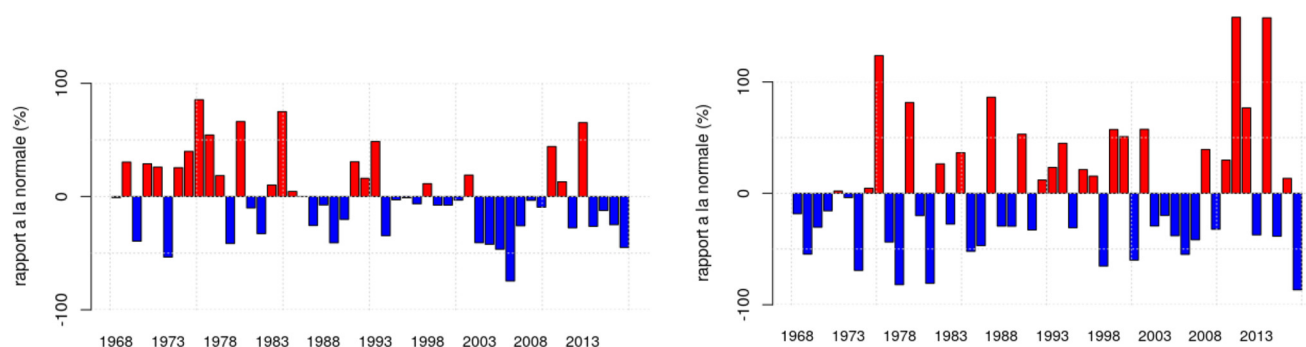


Fig. 4. (a) Rapport à la normale des pluies cumulées sur les mois de mars à août ; à gauche ; (b) écart à la normale des pluies cumulées sur les mois d'octobre à novembre, à droite.

hydrologique. La pente de Sen ( $\beta$ ) représente la médiane de toutes les pentes calculées entre chaque paire de points.

## 4 Résultats

### 4.1 Tendances sur les précipitations

À l'échelle annuelle, la tendance des précipitations (estimateur de Sen) est de  $-5,4$  mm/an et n'est pas significative selon le test de Mann-Kendall. Cette tendance représente 270 mm sur les 50 ans observés et s'avère être du même ordre de grandeur que la médiane des débits annuels observés à Pont de Fer. La figure 3 présente la tendance des pluies annuelles sur la période étudiée, on note une variabilité interannuelle très forte (les années 1972 et 2014 présentent les deux principaux records) qui explique la non-significativité de cette tendance. À l'échelle mensuelle, la seule valeur significative ( $p$ -value  $< 0,1$ ) est le mois de mars :  $-1,3$  mm/mois. Parmi les autres mois, huit montrent une tendance à la baisse, tandis que juillet, octobre et novembre indiquent une tendance à la hausse.

Le rapport à la normale des cumuls saisonniers sur les mois de mars à août, lesquels présentent une tendance négative, et le rapport à la normale des cumuls des mois

d'octobre et novembre, lesquels présentent une tendance positive, sont tracés sur la figure 4. Une tendance significative à la baisse ( $P < 0,01$ ) est constatée pour les cumuls printaniers et estivaux avec une pente de Sen de  $-2,81$  mm et aucune tendance significative à la hausse est ressortie pour les pluies automnales (pente de Sen de  $1,28$  mm). La période (2003–2017) indique un déficit pluviométrique printanier qui perdure (Fig. 2a). La dernière décennie enregistre deux cumuls automnal très important (671 mm pour 2011 et 670 mm pour 2015, à comparer à la médiane de la période étudiée de 210 mm). La variabilité naturelle du climat méditerranéen joue de manière particulièrement forte et traduit la difficulté à quantifier précisément la tendance sur les précipitations dans les séries observées, notamment en période automnale.

Aucune tendance n'a été détectée pour les précipitations annuelles maximales de  $n$ -jours. Ceci est certainement dû à la difficulté de trouver des tendances sur les valeurs extrêmes, en particulier sur des données relativement localisées.

Les indices basés sur les précipitations quotidiennes au-dessus et au-dessous des seuils montrent une tendance à l'assèchement sur l'ensemble de la période 1968–2017 (Tab. 4). Les indices des jours humides (WDx) ont montré une tendance à la baisse significative pour les seuils allant de 2 à 20 mm. Dans le



**Tableau 4.** Pente de Sen des tendances linéaires et valeur du test de Mann-Kendall sur les indices pluviométriques.

Types	Indices	Seuil 2 mm	Seuil 5 mm	Seuil 10 mm	Seuil 20 mm	Seuil 30 mm
Seuil	WDx	-0.333 ++	-0.250 ++	-0.161 +	-0.118 ++	-0.059 -
	INTx	-0.013 -	-0.004 -	0.010 -	0.020 -	0.003 -
	PRTOTx	-5.412 -	-5.274 -	-4.521 -	-3.850 -	-2.784 -
Durée	CWDx	0.000 -	0.000 -	0.000 -	0.000 -	0.000 -
	CDDx	-0.029 -	0.000 -	-0.094 -	0.167 -	-0.050 -
	DSLx	0.032 -	0.068 ++	0.073 -	0.152 +	0.136 -

Les symboles représentent le niveau de signification selon le test de Mann-Kendall. (+++):  $P < 0,01$ ; (++) :  $P < 0,05$ ; (+) :  $P < 0,1$ ; (-) : non significatif.

**Tableau 5.** Pente de Sen des tendances linéaires et valeur du test de Mann-Kendall sur les indices hydrologiques absolus mensuel (mm/mois), annuel (mm/an) et Max1j (mm/jour).

	Jan.	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Année	Max1j
Pont de Fer	-0.205 -	-0.347 -	-0.480 ++	-0.423 +++	-0.136 +	-0.034 -	-0.004 -	0.000 -	-0.002 -	-0.014 -	0.122 -	0.029 -	-1.987 -	-0.062 -
Malière	-0.242 -	-0.342 -	-0.522 +	-0.368 ++	-0.144 -	-0.013 -	0.000 -	0.000 -	0.000 -	-0.016 -	0.223 -	0.180 -	-3.537 -	-0.083 -
Valescure	-0.216 -	-0.489 -	-0.570 -	-0.570 +++	-0.172 -	-0.043 -	0.000 -	0.000 -	0.000 -	0.000 -	0.319 -	0.176 -	-2.466 -	-0.030 -
Maurets	-0.377 -	-0.540 +	-0.872 ++	-0.561 +++	-0.292 +	-0.090 +	-0.003 -	0.000 -	0.000 -	-0.011 -	0.046 -	-0.077 -	-4.866 +	-0.098 -
Vaubarnier	-0.485 -	-0.403 -	-0.862 ++	-0.655 +++	-0.334 +	-0.110 -	-0.036 -	-0.008 -	-0.040 +	-0.100 +	-0.048 -	0.037 -	-3.801 -	-0.033 -
Rimbaud	-1.297 -	-1.157 -	-1.304 ++	-1.080 +++	-0.348 +	-0.034 -	-0.004 -	0.000 -	0.000 -	0.000 -	0.448 -	0.123 -	-6.357 -	-0.065 -

Les symboles représentent le niveau de signification selon le test de Mann-Kendall. (+++):  $P < 0,01$ ; (++) :  $P < 0,05$ ; (+) :  $P < 0,1$ ; (-) : non significatif.

cas de la durée de la période de sécheresse (DSLx), une tendance à la hausse significative a été observée pour les seuils de 5 et 20 mm. Aucune tendance significative n'a pu être identifiée à partir des autres indices caractérisant la durée ou l'intensité des précipitations (CWD ou CDD). Ces indices semblent trop sensibles à l'échantillonnage, car une forte pluie peut perturber le calcul des jours secs consécutifs.

## 4.2 Tendances hydrologiques

Les débits annuels, saisonniers et d'étiage ont été analysés à l'aide des indices hydrologiques définis à la [section 3.2](#). Nous avons examiné les tendances dans les débits moyens annuels, maximums annuels et moyens mensuels. Pour les débits moyens annuels, toutes les tendances détectées étaient négatives (allant de  $-2,15$  mm/an à Pont de Fer à  $-6,36$  mm/an à Rimbaud) mais non significatives sauf pour le bassin du Maurets avec une tendance significative de  $-4,87$  mm/an ([Tab. 5](#)). La [figure 1](#) représente le tracé des écoulements annuels à Pont de Fer et l'année 2011 présente le maximum enregistré sur la période totalisant 800 mm. Le [tableau 5](#) indique également des tendances à la baisse, quoique non significatives, du débit maximal annuel.

À l'échelle saisonnière, tous les bassins versants ont présenté des tendances négatives significatives pour les débits printaniers, en particulier pour mars et avril. Par ailleurs, seul le sous-bassin de Vaubarnier a présenté une tendance à la baisse significative en septembre et octobre. La [figure 5](#) présente la tendance à la baisse des écoulements mensuels des mois d'avril et mai pour le bassin de Pont de Fer. La tendance est de  $-0,423$  mm/mois pour le mois d'avril, soit 50 mm sur les 50 années d'observations, la médiane étant de 15 mm pour ce mois sur la série.

Le débit diminue dans au moins un de ces mois dans les deux bassins versants (Vaubarnier et Maurets), tandis que dans les autres bassins versants, il augmente. Toutefois, les tendances ne sont pas significatives. Les valeurs nulles de la pente de Sen observées pour les mois d'été (juillet-août) sont influencées par les débits nuls de ces mois, à l'exception du bassin versant de Vaubarnier qui a le débit le plus soutenu en été.

Le [tableau 6](#) présente les indices de débits d'étiage et de durées sèches calculés. Il semble que :

- La période d'étiage commence plus tôt pour tous les bassins versants, à l'exception du sous-bassin de Malière, et ce changement n'est significatif que pour le sous-bassin de Rimbaud. Le fonctionnement de ce bassin est fortement lié aux précipitations car il a un coefficient de ruissellement élevé (peu de profondeur des sols). La diminution des précipitations printanières entraîne alors des étiages plus précoces. L'amplitude observée de ce changement est en moyenne de 19 jours sur la période de 50 ans.
- La fin de la période d'étiage intervient plus tard pour tous les bassins versants ; ce décalage est significatif pour les bassins de Pont de Fer et de Valescure. Pour cinq des six bassins versants, la période de sécheresse commence plus tôt et se termine plus tard dans l'année. Dans l'ensemble, la période d'étiage est plus longue et elle est centrée sur une date ultérieure, ce qui représente un décalage de 1 à 3 semaines sur la période d'observation.
- Les tendances sur les durées de l'étiage sont significatives pour les deux plus petits bassins versants. Le déficit en volume (DEF) augmente pour tous les bassins versants et de manière significative uniquement pour Vaubarnier. Ce sous-bassin versant est le plus fortement touché en termes de déficit d'étiage, suivi du sous-bassin versant des

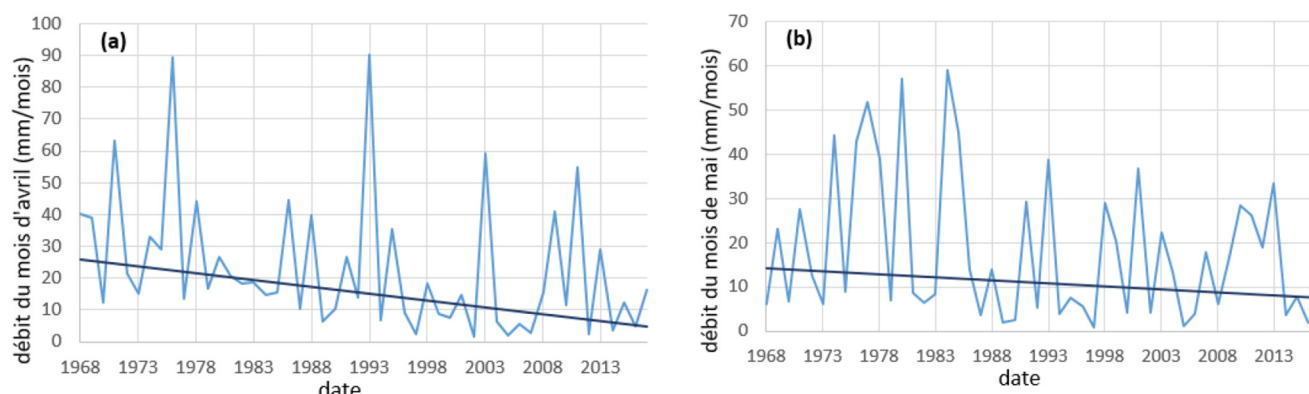


Fig. 5. (a) Ecoulement mensuel du mois d'avril à Pont de Fer ; (b) Ecoulement mensuel du mois de mai à Pont de Fer.

Tableau 6. Pente de Sen des tendances linéaires et valeur du test de Mann-Kendall sur les indices d'étiage pour chaque bassin versant.

	Début		Centre		Fin		DE		DEF		BFI		Base Flow		BFI moyen
Pont de Fer	-0.214	-	0.188	-	0.607	++	0.875	-	0.011	-	-0.001	-	-0.960	++	0.308
Malière	0.400	-	0.528	+++	0.500	-	0.243	-	0.007	-	0.003	+++	-0.785	-	0.332
Valescure	-0.151	-	0.267	-	0.477	+	0.409	-	0.001	-	0.000	-	-1.294	-	0.290
Maurets	-0.024	-	0.333	-	0.556	-	1.091	-	0.028	-	0.000	-	-1.639	-	0.332
Vaubarnier	-0.410	-	0.438	+	0.500	-	2.143	+++	0.100	++	-0.002	-	-1.841	-	0.388
Rimbaud	-0.375	+++	0.000	-	0.171	-	0.875	+	0.005	-	-0.001	-	-2.604	+++	0.211

Les symboles représentent le niveau de signification selon le test de Mann-Kendall. (+++):  $P < 0,01$ ; (++) :  $P < 0,05$ ; (+) :  $P < 0,1$ ; (-) : non significatif.

Maurets. Ce sont les deux bassins versants qui soutiennent fortement la période de faible débit (valeurs élevées du BFI) et sont donc plus sensibles en période de faible débit. Les bassins versants comme celui de Rimbaud, avec des débits nuls en été, sont moins affectés en termes de déficit bien que leur période de basses eaux augmente, en raison de leur faible capacité de rétention. Le débit de base (Base Flow) montre une tendance à la baisse pour tous les bassins versants et est significatif pour les bassins de Pont de Fer et de Rimbaud.

- Les faibles valeurs du BFI (BFI moyen) reflètent une faible capacité de stockage (par exemple 0,21 pour le sous-bassin de Rimbaud) et les valeurs plus élevées reflètent une capacité de stockage supérieure (0,39 pour le sous-bassin de Vaubarnier). Les résultats sont toutefois partagés : on observe une tendance à la baisse pour trois bassins versants et une tendance à la hausse pour les trois autres. Une seule tendance positive est significative (Malière).

## 5 Discussion

Les débits mensuels montrent une tendance à la baisse significative des débits printaniers pour six bassins versants, en mars et avril. Le sous-bassin versant des Maurets est le seul bassin versant présentant une baisse significative des débits mensuels pendant six mois de février à juin. Cette diminution persistante de ces débits saisonniers expliquerait la seule diminution significative observée pour ce bassin des débits annuels. Par ailleurs, le bassin versant du Vaubarnier est le seul

à présenter une baisse significative des débits en septembre et octobre. Pour ce bassin versant, la diminution de ces débits mensuels est confirmée par l'augmentation significative du déficit en volume des étiages et de la durée des étiages. Parmi les autres bassins versants, deux d'entre eux (Pont de Fer et Rimbaud) montrent une diminution significative du débit de base (BFlow), associée à un allongement significatif de la période de faible débit.

Dans cette partie, nous essayons de comprendre les raisons de ce changement. Ces tendances et leur variabilité sur l'ensemble du bassin versant peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs qui sont détaillés ci-dessous.

### 5.1 Facteurs climatiques

Une diminution des débits est souvent liée à une diminution des précipitations. Cependant, les précipitations annuelles n'ont montré aucune tendance, comme le rapportent Chaouche *et al.* (2010), qui n'ont pas détecté de tendances significatives dans les précipitations annuelles dans la région méditerranéenne entre 1970 et 2006. Seule une tendance significative à la baisse des précipitations en mars, avec une diminution des jours humides (seuils entre 2 et 20 mm/jour) et une période de sécheresse plus longue a été détectée sur le bassin versant. Ces facteurs peuvent avoir un impact direct sur la diminution des débits et les changements dans la genèse du ruissellement.

L'évapotranspiration reste cependant un élément essentiel contrôlant le bilan hydrique de surface. Elle dépend de l'évapotranspiration potentielle (ETP), qui représente la

**Tableau 7.** Pente de Sen des tendances linéaires et valeur du test de Mann-Kendall sur l'ETP au poste de Toulon et sur la température au poste du Cannet des Maures.

	Jan.	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Année
ETP(mm/décade)	0.69 -	1.05 ++	1.71 ++	0.98 -	1.33 -	2.38 +++	2.50 +++	1.00 -	2.32 +++	1.00 +	0.86 +	0.47 -	15.76 ++
Tmin (°C/décade)	0.07 -	-0.13 -	0.08 -	0.20 ++	0.43 +++	0.38 +++	0.44 +++	0.50 +++	0.16 -	0.35 ++	0.17 -	0.31 +	0.07 -
Tmoy (°C/décade)	0.13 -	0.03 -	0.26 ++	0.24 +	0.43 ++	0.43 +++	0.37 +++	0.48 +++	0.19 +	0.27 ++	0.19 -	0.22 -	0.31 +++
Tmax (°C/décade)	0.20 -	0.24 -	0.36 +++	0.23 ++	0.47 +++	0.49 +++	0.27 ++	0.54 +++	0.29 +	0.17 -	0.18 +	0.13 -	0.39 +++

Les symboles représentent le niveau de signification selon le test de Mann-Kendall. (+++):  $P < 0,01$ ; (++) :  $P < 0,05$ ; (+) :  $P < 0,1$ ; (-) : non significatif.

demande climatique, et de l'humidité supérieure du sol, qui représente la quantité réelle d'eau pouvant être mobilisée. Afin d'évaluer la demande climatique, les températures de la station climatologique la plus proche (Le Cannet des Maures, réseau de Météo-France) de 1959 à 2011 et l'ETP mensuelle calculée par la formule Penman-Monteith de la station de Toulon de 1959 à 2014, ont été étudiées (Tab. 7).

À l'échelle annuelle, la température moyenne présente des variations significatives avec  $+1,6^{\circ}\text{C}$  de 1959 à 2011, soit  $+0,3^{\circ}\text{C}$  par décennie. Cette valeur est cohérente avec celles trouvées par [Chaouche et al. \(2010\)](#) qui ont noté les mêmes taux dans la région méditerranéenne française et avec celles de [Lespinas et al. \(2010\)](#) qui ont observé une augmentation de  $+1,4^{\circ}\text{C}$  entre 1965 et 2004 en Languedoc-Roussillon. À l'échelle mensuelle, il y a une augmentation significative de la température au printemps et en été. Les mois présentant les plus importantes augmentations vont de mai à août. La température a également augmenté en hiver (décembre), mais avec une amplitude plus faible. L'évapotranspiration potentielle annuelle (ETP) présente une tendance significative à la hausse avec une amplitude de  $+1,6\text{ mm/an}$ , cohérente avec les résultats de [Chaouche et al. \(2010\)](#) qui ont trouvé une tendance variant entre  $+1$  et  $+4\text{ mm/an}$ . Des changements importants dans l'ETP mensuelle montrent des tendances à la hausse au cours de certains mois. Aucune tendance n'est observée dans l'ETP mensuelle en avril, mai ou août, alors que des tendances significatives dans les températures mensuelles sont observées. Ces écarts s'expliquent par les différences de conditions climatiques locales, Toulon étant au bord de la mer, au sud du bassin versant, alors que le Cannet des Maures est situé à l'intérieur des terres, au nord du bassin versant.

Il y a des tendances communes entre les bassins versants, comme une plus grande sévérité de la période de faible débit, mais la réponse varie selon le sous-bassin versant. Premièrement, des différences très notables sont observées sur les très petits bassins versants. En effet, sur les petits bassins versants, les caractéristiques de la réponse hydrologique sont plus facilement détectables à partir de l'analyse des données et interprétables en fonction de caractéristiques physiques simples. C'est le cas des bassins versants de Rimbaud et de Vaubarnier, leur sensibilité aux variations climatiques est totalement différente. Deuxièmement, les caractéristiques physiographiques des bassins versants (topographie, géologie, lithologie, etc.) impliquent différentes sensibilités des bassins versants aux changements climatiques. Troisièmement, la capacité de stockage de l'eau des bassins versants semble être un facteur explicatif important des différents impacts des variations climatiques sur les débits. Plus la capacité de

stockage du bassin versant est grande ou plus la dynamique du bassin versant est lente (forte inertie), plus les faibles débits seront affectés par une diminution des précipitations et une augmentation des températures. Ceci s'explique par la diminution des débits souterrains et leur contribution aux débits de base. C'est le cas des deux bassins versants du Maurets et du Vaubarnier, qui ont la dynamique la plus faible et se caractérisent par une capacité d'infiltration supérieure.

Afin de combiner ETP et humidité du sol, le modèle hydrologique conceptuel GR4J ([Perrin et al., 2003](#)) largement étudié a été appliqué à l'exutoire du bassin (Pont de Fer) avec les données observées : de 1968 à 2015. Les tests de tendance effectués sur les séries annuelles du niveau de réservoir qui représente la quantité d'eau dans la couche supérieure du sol, indiquent une tendance décroissante avec un niveau particulièrement bas pour les années 1989 et 2007. De plus, les chroniques simulées d'humidité du sol issues de la réanalyse du modèle Safran-Isba-Modcou ([Habets et al., 2008](#) ; [Vidal et al., 2010](#)) ont été également testées sur le bassin versant. Les tests indiquent une décroissance significative de l'humidité du sol. Les résultats obtenus ici sont cependant cohérents avec nos analyses issues de l'observation. L'augmentation de la demande d'évaporation combinée à une diminution des pluies de mars à août, tend à assécher la couche superficielle des sols réduisant ainsi l'alimentation des cours d'eau. Ces premières analyses de modélisation devront être complétées afin d'attribuer les dérives hydrologiques constatées aux différentes causes climatiques s'inspirant d'études déjà réalisées sur cette problématique comme celles récentes de [Barella-Ortiz et Quintana-Segui, \(2019\)](#) et de [Quintana-Segui et al. \(2020\)](#) sur le territoire espagnol.

## 5.2 Occupation du sol

Les tendances sur les débits peuvent également être dues à des changements dans l'occupation du sol. En effet, l'évolution de l'occupation du sol peut affecter le régime des rivières. Ces perturbations sont généralement causées par des actions humaines, comme l'urbanisation, la déforestation, l'agriculture ou des causes naturelles comme les incendies. Ce point n'a pas été pris en compte dans nos explications car le bassin versant du Réal Collobrier est un bassin versant forestier faiblement touché par l'activité humaine depuis plus de 50 ans. En effet, cette partie du massif des Maures est peu propice à l'installation humaine du fait de ses fortes pentes et de ces points d'eaux d'une disponibilité souvent temporaire. La seule zone urbaine (le village de Collobrières) s'est peu étendue et elle se situe en aval des cinq petits sous-bassins étudiés. Seul le bassin versant de Rimbaud a été brûlé par les

feux de forêt en 1990 (80 % de sa surface). Des études sur l'impact de cet incendie sur les débits ont montré que seule la dynamique de crue a été affectée pendant une période de quatre ans après l'incendie (Lavabre *et al.*, 2000 ; Folton *et al.*, 2015). Aucun impact n'a été observé sur les débits annuels ou les faibles débits dans ce bassin versant. Ces arguments suggèrent que les caractéristiques physiographiques et la couverture végétale du bassin versant étant demeurées relativement stables au cours des 50 dernières années, elles ne peuvent être considérées comme un facteur explicatif des tendances de l'écoulement.

## 6 Conclusion

L'analyse de la période 1968–2017 des données du bassin versant du Réal Collobrier montre une diminution des précipitations en mars et une diminution de la durée des précipitations. Avec l'augmentation observée des températures et de l'ETP, les facteurs climatiques ont tendance à diminuer la quantité d'eau disponible dans les bassins versants. Ceci est observé globalement dans tous les sous-bassins versants étudiés, en particulier au printemps et pendant la période de basses eaux.

Les facteurs hydrologiques modulent les tendances climatiques entre les sous-bassins versants. En fonction de leur fonctionnement hydrologique, l'impact d'un changement climatique conduit à des réponses très contrastées. Les débits réagissent non seulement à l'ampleur des changements dans les précipitations et la température, mais aussi au moment où ces changements se produisent. Ainsi, les réductions significatives observées dans les précipitations printanières entraînent des changements dans les débits printaniers, estivaux ou automnaux, en fonction des caractéristiques des bassins versants. Par exemple, il existe un lien direct entre le climat de la même saison et les changements de débit dans le petit bassin versant du Rimbaud où les débits printaniers montrent une relation claire avec les précipitations printanières et la température du printemps à l'été. Ceci est certainement dû à la faible capacité de stockage de ce bassin versant, associée à une faible « mémoire hydrologique ». Le débit printanier diminue avec les précipitations mais aussi avec l'augmentation de la température associée à un potentiel d'évapotranspiration plus élevé. Dans ce bassin versant, l'augmentation de la température estivale (et l'évapotranspiration potentielle) n'est pas associée à une diminution du débit estival (en raison de grandes périodes de débits nuls sur la série de 50 ans), mais à un allongement significatif de la période de faible débit.

Cette étude montre également que les bassins versants qui supportent habituellement les bas débits sont les plus sensibles aux perturbations climatiques. Contrairement au bassin versant de Rimbaud, le bassin versant de Vaubarnier reflète une grande capacité de stockage (valeur élevée du BFI) qui limite la sensibilité des faibles débits aux évolutions du climat.

Ainsi, des changements importants dans les précipitations printanières, combinés à l'augmentation des températures printanières et estivales et de la demande d'évapotranspiration, ont une influence sur une diminution importante des débits printaniers, estivaux et automnaux. Par conséquent, la durée des périodes de basses eaux augmente considérablement, et le déficit de volume augmente également.

Le bassin versant des Maurets, présente également une variation relativement importante des débits mensuels, avec une baisse significative de février à juin. Le bassin versant de Valescure, proche du précédent, présente un contraste. La baisse significative ne concerne que les débits du mois d'avril. Et sur le bassin versant de Pont de Fer, les tendances sur les indices hydrologiques sont plus lisses, à l'exception de la baisse significative du débit de base.

Les informations hydrologiques à échelles spatiales fines obtenues grâce au bassin versant de recherche du Réal Collobrier nous ont permis d'observer qu'à cette échelle l'impact d'une variation climatique sur l'hydrologie est beaucoup plus variable que la variabilité imposée par le climat. La relation entre les précipitations et le ruissellement est complexe et les non-linéarités sont multiples (entre le débit et les variables climatiques telles que les précipitations ou la température). Ceci rend difficile la compréhension et la quantification de l'influence du changement climatique détecté sur la ressource en eau. Toutefois, cela semble être propre aux petits bassins hydrographiques étudiés. Ceci doit être considéré comme un résultat important car il souligne la diversité et complexité du fonctionnement à petite échelle selon les caractéristiques physiques des bassins.

Cette étude menée volontairement sur les observations de long-terme des données brutes pourrait être poursuivie et complétée par une analyse des processus hydrologiques s'appuyant sur des modélisations hydrologiques. Et poursuivre aussi par des simulations climatiques avec des hypothèses de stationnarité et de dérive des pluies et/ou des ETP afin de pouvoir attribuer les dérives hydrologiques aux différentes causes climatiques engendrées. La sécheresse hydrologique est affectée par les sécheresses météorologiques mais généralement à une échelle de temps plus longue que la sécheresse de l'humidité des sols. Cette analyse, assez conséquente pourrait venir enrichir les résultats obtenus sur les observations brutes et faire l'objet d'une suite dans un prochain numéro de *La Houille Blanche*.

*Remerciement.* Les auteurs remercient le relecteur anonyme pour sa relecture attentive et pour ses commentaires pertinents.

## Références

- Allen RG, Pereira L, Raes D, Smith M. 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage, Paper 56.
- Barella-Ortiz A, Quintana-Seguí P. 2019. Evaluation of drought representation and propagation in regional climate model simulations across Spain. *Hydrol Earth Syst Sci* 23(12): 5111–5131.
- Burt TP, McDonnell JJ. 2015. Whither field hydrology? The need for discovery science and outrageous hydrological hypotheses. *Water Resour Res* 51(8): 5919–5928.
- Chaouche K, Neppel L, Dieulin C, *et al.* 2010. Analyses of precipitation, temperature and evapotranspiration in a French Mediterranean region in the context of climate change. *C R Geosci* 342(3): 234–243. ISSN 1631-0713.
- Folton N, Andréassian V, Duperray R. 2015. Hydrological impact of forest fire from paired catchment and rainfall-runoff modelling perspectives. *Hydrol Sci J*, Taylor & Francis, 60(7-8): 1213–1224.
- Giuntoli I, Renard B, Vidal JP, Bard A. 2013. Low Flows in France and their relationship to large scale climate indices. *J Hydrol*, Elsevier, 482: 105–118.

- Habets F, Boone A, Champeaux JL, *et al.* 2008. The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *J Geophys Res: Atmosp* 113(D6).
- Hamed KH, Rao AR. 1998. A modified Mann-Kendall trend test for auto correlated data. *J Hydrol* 204: 182–196.
- Hertig E, Trambly Y. 2017. Regional downscaling of Mediterranean droughts under past and future climatic conditions. Climate variability and change in the Mediterranean region. *Global Planet Change* 151 (No Special): 36–48. ISSN 0921-8181.
- Hipel KW, McLeod AI. 2005. Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems. Electronic reprint of our book originally published in 1994.
- Kendall MG. 1975. Rank Correlation Methods. London (UK): Griffin.
- Kirkby. 2004. Geomorphology: Critical Concepts in Geography, Volume II, Hillslope Geomorphology. London: Routledge, 16 p.
- Lavabre J, Martin C, Folton N. 2000. Impact de l'incendie sur le comportement hydrologique du bassin versant. Chapitre III. *Cemagref Ed., Coll. Etud.* 16: 33–49.
- Lespinas F, Ludwig W, Heussner S. 2010. Impact of recent climate change on the hydrology of coastal Mediterranean rivers in Southern France. *Clim Change* 99: 425–456.
- Lyne VD, Hollick M. 1979. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. *Hydrol Water Resour Symp.* Perth (Australia): Institution of Engineers.
- Perrin C, Michel C, Andréassian V. 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J Hydrol* 279(1-4): 275–289.
- Peterson TC, Folland C, Griza G, Hogg W, Mokssit A, Plummer N. 2001. Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998–2001, WMO, Rep. WCDMP-47, WMO-TD 1071, Genève (Switzerland), 143 p.
- Pujol N, Neppel L, Sabatier R. 2007. Regional tests for trend detection in maximum precipitation series in the French Mediterranean region. *Hydrol Sci J* 52(5): 956–973. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.5.956>.
- Quintana-Segui P, Barella-Ortiz A, Regueiro-Sanfiz S, Miguez-Macho G. 2020. The utility of land-surface model simulations to provide drought information in a water management context using global and local forcing datasets. *Water Resour Manag* 34(7): 2135–2156.
- Ribes A, Thao S, Vautard R, *et al.* 2018. Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean. *Clim Dyn.* <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4179-2>.
- Sen PK. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *J Am Stat Assoc* 63: 1379–1389.
- Stewart IT, Cayan DR, Dettinger MD. 2005. Changes toward earlier streamflow timing across western North America. *J Clim* 18: 1136–1155.
- Theil H. 1950. A rank invariant method of linear and polynomial regression analysis: Part 3. *Nederland's Akad Wetensch Proc* 53: 1397–1412.
- Tolsa M, Folton N, Arnaud P. 2015. Bassin versant expérimental du Réal Collobrier [Data set]. Irstea. <https://doi.org/10.17180/obs.real>.
- Trambly Y, Neppel L, Carreau J, Najib K. 2013. Non-stationary frequency analysis of heavy rainfall events in Southern France. *Hydrol Sci J* 58(2): 280–294.
- Vidal JP, Martin E, Franchistéguy L, *et al.* 2010. Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite.
- Yue S, Wang C. 2004. The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. *Water Resour Manag* 18(3): 201–208.
- Yue S, Pilon P, Phinney B, Cavadias G. 2002 The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrology series. *Hydrol Process* 16: 1807–1829.

**Citation de l'article** : Folton N, Martin E, Arnaud P, Tolsa M. 2020. Cinquante ans de processus hydrologiques observés dans des petits bassins versants méditerranéens : vers une raréfaction de la ressource en eau ? *La Houille Blanche* : 17–27