

## Journal d'hydrologie : études régionales

[Volume 12](#) , août 2017 , pages 13-32

# Événements hydrologiques extrêmes et influence des réservoirs dans un bassin fluvial hautement régulé du nord-est de l'Espagne

Les liens d'auteur ouvrent le panneau de superpositionSM Vicente-Serrano <sup>a</sup>J. Zabalza-Martinez <sup>a</sup>G. Borras <sup>b</sup>Jl López-Moreno <sup>a</sup>E. Pla <sup>d</sup>D. Pascual <sup>c</sup>R. Savé <sup>c</sup>C. Bienne <sup>d</sup>I. Funès <sup>c</sup>C. Azorin-Molina <sup>a</sup>A. Sanchez-Lorenzo <sup>a</sup>N. Martín-Hernández <sup>a</sup>M. Peña-Gallardo <sup>e</sup>E. Alonso-González <sup>a</sup>M. Tomas-Burguera <sup>a</sup>A. El Kenawy <sup>f</sup>

Citer : <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.01.004>[Obtenir des droits et du contenu](#)

Sous licence Creative [Commons](#) *Libre accès*

### Points forts

- Contribution différente des débits faibles et élevés dans les cours supérieurs et les cours inférieurs.
- La capacité du réseau de réservoirs à réduire les inondations catastrophiques est discutable.
- Les réservoirs ont affecté la fréquence et la gravité des sécheresses hydrologiques.

### Résumé

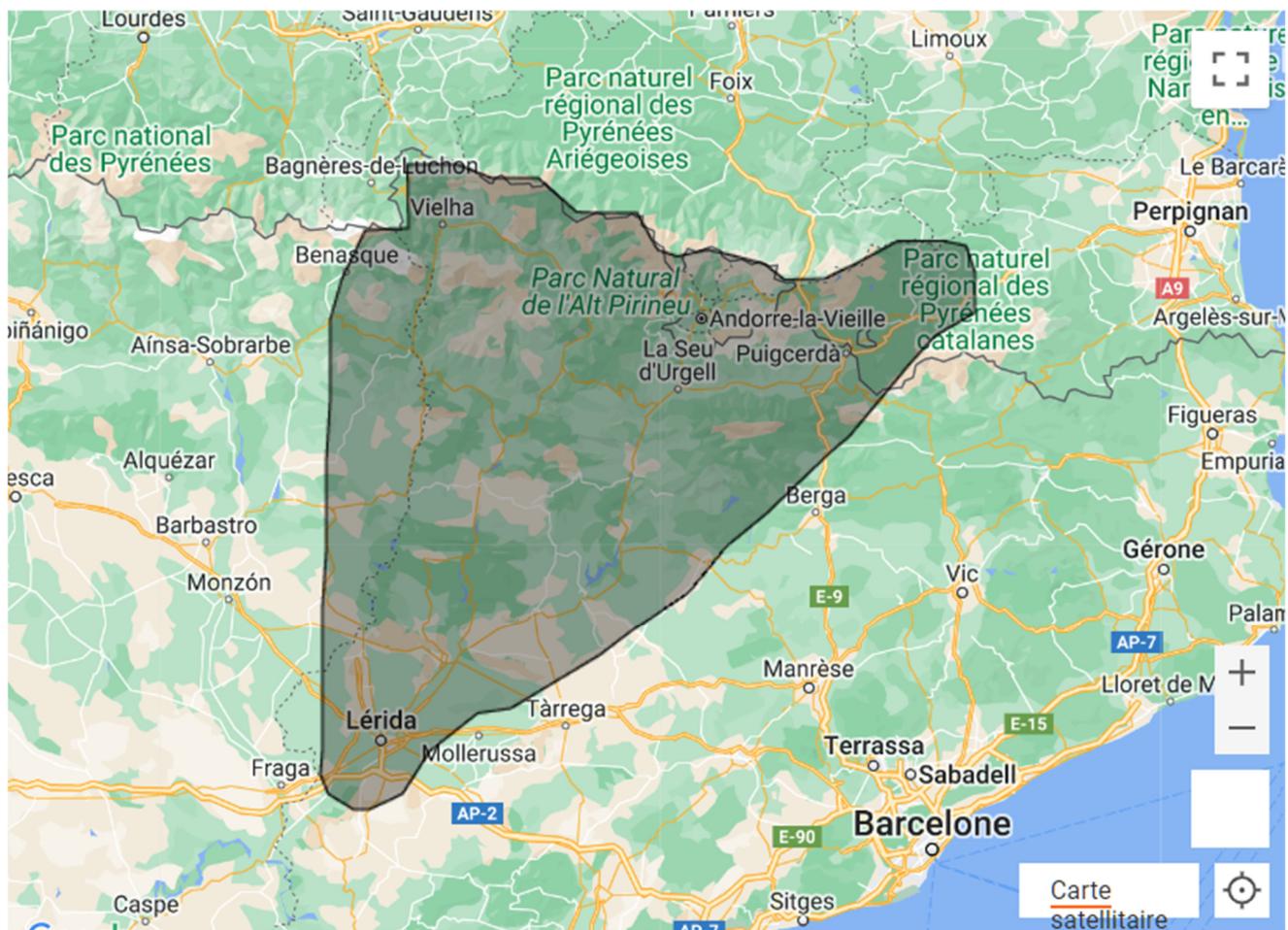
Région d'étude : Le bassin du Segre (nord-est de l'Espagne).

Objet de l'étude

Le bassin du Segre est largement régulé, par un réseau dense de barrages, au cours de la seconde moitié du XXe siècle. Cette étude a évalué l'impact de la régulation fluviale sur l'évolution des événements hydroclimatologiques extrêmes à travers le bassin au cours des six dernières décennies (1950-2013). Nous avons évalué si l'occurrence des inondations et des sécheresses hydrologiques a changé, et si ces changements ont différé spatialement entre les eaux d'amont et les zones inférieures du bassin. À cette fin, nous avons utilisé un ensemble d'indices hydroclimatologiques afin de quantifier l'évolution de la quantité ainsi que la fréquence des quantiles de fortes précipitations et d'inondations. Les changements de ces variables ont été évalués au moyen du coefficient Mann–Kendall Tau non paramétrique.

Nouvelles connaissances hydrologiques

Les résultats révèlent une réduction générale de l'occurrence des événements de précipitations extrêmes dans le bassin du Segre de 1950 à 2013, ce qui correspond à une réduction générale des débits élevés mesurés à diverses stations jaugées à travers le bassin. Bien que cette étude démontre des différences spatiales dans la diminution du débit entre les cours supérieurs et les parties inférieures du bassin, principalement associées à des changements dans la régulation du fleuve, il n'y a pas eu de réduction de la fréquence des crues extraordinaires. Les changements dans les pratiques de gestion de l'eau dans le bassin ont eu un impact significatif sur la fréquence, la durée et la gravité des sécheresses hydrologiques en aval des principaux barrages, en raison de l'intense régulation de l'eau pour répondre aux demandes en eau pour l'irrigation et les élevages. Néanmoins, ...



[Télécharger les données](#)

## 1. Introduction

Déterminer l'occurrence d'événements extrêmes dans le cycle hydrologique est l'une des principales priorités des hydrologues et des gestionnaires de l'eau, car ces événements ont généralement des impacts économiques, environnementaux et sociaux majeurs (par exemple [Kunkel et al., 1999](#), [Van Dijk et al., 2013](#)). Dans des conditions de réchauffement climatique, la fréquence et l'ampleur des événements de précipitations extrêmes sont susceptibles d'augmenter ([Trenberth, 2012](#)), en raison de l'humidité atmosphérique spécifique plus élevée associée à la relation Clausius–Clapeyron ([Santer et al., 2007](#), [Trenberth et al., 2005](#), [Allan, 2012](#), [Westra et al., 2014](#)). Le dernier rapport du GIEC ([Hartmann et al., 2013](#)) montre que les changements dans les précipitations extrêmes sont compatibles avec un climat plus chaud. Néanmoins, le rapport souligne également que les changements dans les événements de précipitations extrêmes montrent une faible cohérence spatiale ([Alexander et al., 2006](#); [Westra et al., 2013](#); [Dittus et al., 2015](#)).

Les schémas de sécheresse sont encore beaucoup plus difficiles à déterminer ([Vicente-Serrano, 2016](#)). [Seneviratne et al. \(2012\)](#) ont mis en évidence des incertitudes majeures dans l'évolution des sécheresses climatiques dans le monde. Ces difficultés sont confirmées dans une série d'études qui ont évalué les tendances de la sécheresse à l'échelle mondiale (par exemple [Sheffield et al., 2012](#), [Dai, 2013](#), [Trenberth et al., 2014](#)), soulignant la nécessité d'analyser l'évolution des événements hydroclimatiques extrêmes à échelles régionales.

Une autre incertitude importante est la manière dont les événements extrêmes se propagent tout au long du cycle hydrologique, car les événements extrêmes climatiques et hydrologiques ne coïncident généralement pas en termes d'ampleur, d'étendue spatiale et de temps. Cette caractéristique peut être liée à la topographie ([Lorenzo-Lacruz et al., 2013](#), [Barker et al., 2015](#)), aux conditions climatiques antérieures ([Mediero et al., 2014](#)) et au couvert végétal ([Lana-Renault et al., 2012](#); [Serrano-Muela et al., 2015](#)). D'autres variables (p. [Llasat et al., 2014](#), [Mediero et al., 2014](#), [Mediero et al., 2015](#), [Machado et al., 2015](#), [Crooks et Kay, 2015](#)). En outre, alors que les précipitations extrêmes se produisent généralement à des échelles quotidiennes ou même infra-journalières, avec des effets régionaux ou locaux notables, les sécheresses sont généralement étudiées à des échelles mensuelles et ont tendance à toucher des zones plus vastes. Par conséquent, il est important de considérer l'échelle temporelle et spatiale distincte de ces deux types d'événements extrêmes.

Dans la région de la Méditerranée occidentale, il existe des preuves d'une diminution de la fréquence et de l'ampleur des événements de précipitations extrêmes au cours des dernières décennies ([López-Moreno et al., 2010](#), [Gallego et al., 2011](#), [Valencia et al., 2012](#)), tandis que la durée et la sévérité des sécheresses climatiques augmentent ([Vicente-Serrano et](#)

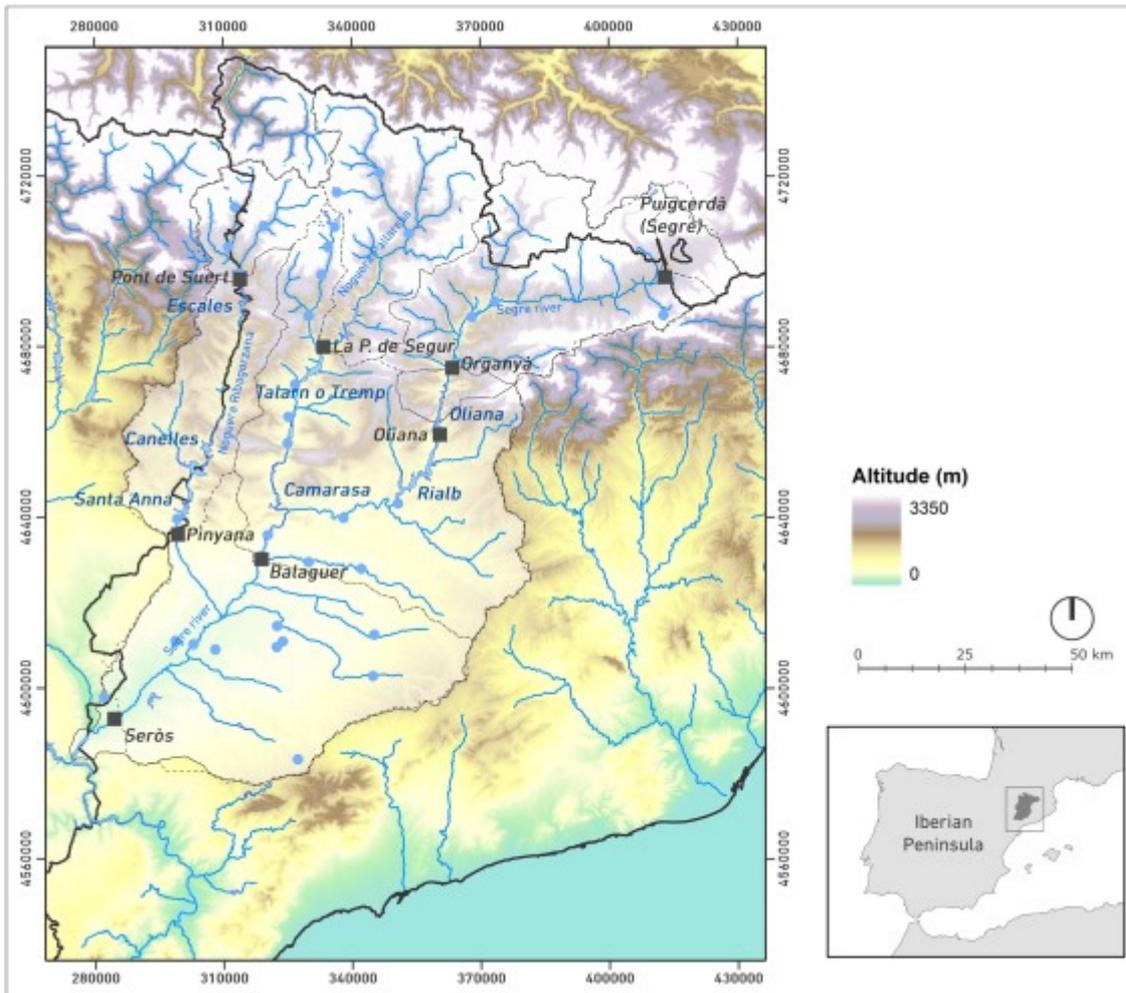
[al., 2014](#) , [Spinoni et al., 2015](#) , [Lorenzo-Lacruz et Morán-Tejeda, 2016](#) , [Coll et al., 2016](#) ). Les crues des rivières ont également diminué, en raison des changements dans les précipitations, combinés à une demande d'évaporation atmosphérique (DEA) plus élevée ( [Mediero et al., 2014](#) ) et augmentation de la couverture végétale en amont ( [López-Moreno et al., 2006](#) ). Les sécheresses hydrologiques ont également montré des augmentations plus importantes de la sévérité et de la durée par rapport aux sécheresses météorologiques. Cette caractéristique peut s'expliquer par l'AED plus élevé ( [Vicente-Serrano et al., 2014](#) ), l'augmentation du tourisme, les demandes urbaines en eau et l'expansion des zones irriguées ( [Lorenzo-Lacruz et al., 2013](#) ).

Dans la région méditerranéenne, la disponibilité des ressources en eau est critique ( [García-Ruiz et al., 2011](#) ). La gestion des ressources en eau dans tout réservoir méditerranéen doit établir un équilibre entre la nécessité de stocker de l'eau pour différents approvisionnements et usages et la nécessité de gérer les inondations et leurs effets catastrophiques ( [López-Moreno et al., 2002](#) ). Cet équilibre est critique, surtout au printemps et en été, en raison de la forte demande en eau et de la forte probabilité d'événements de précipitations extrêmes au cours de ces saisons. Dans ce contexte, bien qu'avec de nombreuses études portant sur les effets des réservoirs sur les régimes fluviaux et les débits en Méditerranée occidentale (par exemple [Batalla et al., 2004](#) , [Piqué et al., 2016](#) , [Vicente-Serrano et al., 2016](#) ), seules quelques études ont pris en compte l'effet conjoint de la gestion des barrages et des réservoirs sur la gravité des inondations et des sécheresses hydrologiques en aval.

Dans cette étude, nous avons étudié l'évolution des événements climatiques et hydrologiques extrêmes au cours des six dernières décennies dans le bassin du Segre (nord-est de l'Espagne). Ce bassin, dont la source se situe dans les Pyrénées, a été fortement régulé par de nombreux barrages au cours de la seconde moitié du XXe siècle ( [Vicente-Serrano et al., 2016](#) ). L'objectif principal de cette étude était de déterminer si l'occurrence et la gravité des inondations et des sécheresses hydrologiques ont changé au cours des dernières décennies, et si ces changements ont différé entre les eaux d'amont et les zones inférieures du bassin.

## 2 . Zone d'étude

Le bassin de Segre est situé dans le nord-est de l'Espagne et son bassin versant couvre environ 13 000 km<sup>2</sup> . Le bassin a trois rivières principales : la rivière Segre (8167 km<sup>2</sup> ; le principal affluent de l'Èbre), la rivière Noguera Pallaresa (2807 km<sup>2</sup> ) et la rivière Noguera Ribagorzana (2061 km<sup>2</sup> ) ( [Fig. 1](#) ). L'altitude varie de 175 m, où le fleuve Segre entre dans l'Èbre, à plus de 3200 m dans les Pyrénées. Le relief provoque des contrastes climatiques et paysagers marqués dans le bassin. En amont pyrénéen , les précipitations dépassent 1100 mm an<sup>-1</sup> , mais dans les basses terres du sud , les précipitations annuelles moyennes sont <300 mm an<sup>-1</sup> . L' évapotranspiration annuelle de référence en amont est < 600 mm an<sup>-1</sup> , mais elle dépasse 1100 mm an<sup>-1</sup> au sud. Les facteurs climatiques et topographiques sont responsables des remarquables contrastes paysagers du bassin. Au nord, les unités paysagères dominantes sont les alpages et les forêts subalpines et subméditerranéennes, dont *Pinus uncinata* , *Pinus sylvestris* , *Fagus sylvatica* et *Quercus* sp. Au centre du bassin (altitudes de 800 à 1000 m), les arbustes et les forêts dominent dans certaines zones, reflétant les changements de succession associés à l'abandon des pentes cultivées au cours du XXe siècle ( [García-Ruiz et Lana-Renault, 2011](#) , [Buendia et al., 2015](#) ). L'agriculture irriguée se produit dans la partie inférieure du bassin, facilitée par la construction de barrages. Le bassin compte 144 000 hectares irrigués, desservis par les canaux d'Urgell, Pinyana, Aragón et Catalunya, et Segarra-Garrigues. Ainsi, les agro-industries et l' élevage intensif sont les principales activités économiques du bassin. Les quelques espaces naturels subsistant dans les terres arides du bassin correspondent aux steppes les plus septentrionales d'Europe ( [Braun-Blanquet et Bolòs, 1958](#) ).



1. [Téléchargement : Télécharger l'image haute résolution \(983 Ko\)](#)
2. [Télécharger : Télécharger l'image en taille réelle](#)

Fig. 1. Répartition spatiale des stations de jaugeage (carrés noirs), des stations de précipitations (cercles bleus) et des réservoirs. Les couleurs d'arrière-plan représentent l'élévation. Les lignes pointillées représentent les limites des différents sous-bassins.

Dans des conditions normales, le fleuve Segre présente un régime saisonnier clair, les principaux débits se produisant en mai et juin, en raison de la fonte des neiges et des fortes précipitations printanières. Cependant, dans la partie inférieure du bassin, le régime fluvial est fortement modifié, conséquence de la mise en eau du fleuve ainsi que de la gestion de l'eau pour les usages d'irrigation et l'approvisionnement urbain ( [Batalla et al., 2004](#) ; [Piqué et al., 2016](#) ). Actuellement, il y a 35 réservoirs dans le bassin du fleuve Segre, fournissant une capacité totale de stockage de 2084 hm<sup>3</sup> (1 hm<sup>3</sup> = 1 000 000 m<sup>3</sup>) : une valeur qui est très proche du débit annuel moyen enregistré près de l'embouchure de la rivière (2130 hm<sup>3</sup>). La plupart de la régulation de l'eau se produit dans le cours supérieur et le cours moyen de la rivière Noguera Ribagorçana et de la rivière Noguera Pallaresa, où les Escales (163 hm<sup>3</sup>), Canelles (687,5 hm<sup>3</sup>), Santa Anna (236,6 hm<sup>3</sup>), Talarn (205,1 hm<sup>3</sup>) et Camarasa (163 hm<sup>3</sup>) sont localisés. Le fleuve Segre est régulé par l'Oliana (101 hm<sup>3</sup>) et le Rialb (402,8 hm<sup>3</sup>) réservoirs ; ce dernier a été créé en 2000. Ces réservoirs ont provoqué une diminution marquée (> 60 %) du débit annuel du fleuve Segre au cours des six dernières décennies ( [Vicente-Serrano et al., 2016](#) ).

La survenue d'événements de précipitations extrêmes est courante dans le bassin ( [Llasat et Puigcerver, 1997](#) , [Beguería et al., 2009](#) ). Ces événements sont associés à des orages de courte durée, isolés et de forte intensité en été. En automne, ces événements sont liés aux rétrotrajectoires des perturbations méditerranéennes, qui impliquent l'apparition de flux de basse couche chauds et humides de nord-est et d'est, avec de l'air continental froid au-dessus des dépressions de coupure sur la mer Méditerranée ( [Ramis et al., 1997](#) ). En plus de ces configurations atmosphériques, les événements de précipitations extrêmes sont renforcés par la complexité du terrain ( [Pastor et al., 2001](#) ), rendant certaines inondations historiques dans le bas catastrophiques, avec de graves impacts environnementaux, économiques et sociétaux ( [Arbiol et al., 1984](#) , [Barriendos et al., 2003](#) , [Thorndycraft et al., 2006](#) , [Llasat et al., 2009](#) , [Llasat et al., 2010](#) , [Llasat et al., 2013](#) ).

Dans le nord-est de l'Espagne, les périodes de sécheresse climatique sont fréquentes, en raison de l'apparition d'étiages et de sécheresses hydrologiques ( [Vicente-Serrano, 2006](#) , [Lorenzo-Lacruz et al., 2013](#) ). En particulier, certains bassins

hydrologiques ont souffert de sécheresses longues, intenses et sévères au cours des trois dernières décennies, en réponse à la diminution des précipitations et à l'augmentation de l' AED ( [López-Bustins et al., 2013](#) , [Vicente-Serrano et al., 2014](#) ).

### 3 . Données et méthodes

#### 3.1 . Données

L' Autorité de gestion du bassin de l'Èbre (Confederación Hidrográfica del Ebro) a fourni les données quotidiennes sur le débit du bassin du Segre. Les données quotidiennes de débit de 11 stations de jaugeage ont été choisies pour cette étude car ces stations avaient moins de 15 % de données manquantes pour la période 1950-2013 ( [Fig. 1](#) ). Le remplissage des lacunes a été effectué à l'aide d'une analyse de régression linéaire, dans laquelle les séries indépendantes ont été dérivées des mêmes rivières dont les données manquaient, ou des affluents proches. Le coefficient de corrélation de Pearson minimum entre les séries du modèle a été fixé à 0,6, suivant [Lorenzo-Lacruz et al. \(1945–2005\)](#) . Comme le montre la [figure 1](#), sept stations de jaugeage sont situées en amont des réservoirs principaux (Puigcerdà, Organyà, Arabó, la Seud'Urgell, Valira, la Pobla de Segur et Pont de Suert), tandis que quatre sont situées en aval (Oliana, Pinyana, Balaguer et Seròs). Pour déterminer le bassin versant correspondant à chaque station de jaugeage, nous avons utilisé un modèle numérique d'élévation (DEM) à une résolution spatiale de 100 m, et l'outil r.watershed dans GRASS (v.6.4). La zone de drainage de chaque station de jaugeage a été définie comme la zone en amont du cours supérieur à la station de jaugeage. Nous avons également utilisé les stockages moyens mensuels du réservoir dans le bassin à partir de 1950 ainsi que la capacité du réservoir en amont des stations de jaugeage situées dans la limite inférieure du bassin.

Des relevés quotidiens de débits ont été utilisés pour analyser l'évolution des crues, et des séries mensuelles de débits ont été calculées à partir des séries quotidiennes pour calculer les indices hydrologiques de sécheresse. Des séries de précipitations quotidiennes ont été obtenues des agences météorologiques espagnoles et catalanes (AEMET et SMC). Un total de 432 stations avec des données quotidiennes sur les précipitations étaient disponibles pour l'ensemble du bassin. Le développement de séries de précipitations quotidiennes complètes, de qualité contrôlée et homogènes est essentiel pour des évaluations climatiques robustes. Il existe plusieurs approches pour combler les lacunes et évaluer l' homogénéité , qui ont été entièrement révisées et comparées dans [Vicente-Serrano et al. \(2010\)](#) pour tout le bassin de l'Èbre (NE Espagne). Ici, nous suivons les recommandations de cette recherche pour développer un ensemble de données de précipitations quotidiennes homogènes et de qualité contrôlée dans le bassin du Segre. De l'ensemble des données (  $N = 432$  ), seules 52 stations candidates, avec plus de 30 ans de données, ont d'abord été sélectionnées. Les autres séries (séries de référence) ont été utilisées pour reconstruire et combler les lacunes de la série candidate. Les séries de précipitations quotidiennes ont été transformées en quantiles , sur la base de leur fonction de distribution cumulative empirique. Pour chaque série candidate, nous avons sélectionné la série de référence la plus proche (à une distance maximale de 10 km), avec au moins 3 ans de données communes. Les lacunes dans la série candidate ont été comblées à l'aide des valeurs quantiles de la station de référence disponible la plus proche. Dans les rares cas où la série candidate n'a pas pu être complétée à l'aide de la série la plus proche voisine, les lacunes existantes ont été comblées en utilisant à la fois la série de référence et d'autres séries candidates jusqu'à une distance maximale de 25 km. Cette procédure a fourni des ensembles de données complets pour chacune des 52 séries candidates. A partir de la série de précipitations quotidiennes, nous avons calculé la somme mensuelle pour tester l'homogénéité temporelle de la série. Pour cela, nous avons utilisé HOMER (Homogenization in R) ( [Mestre et al., 2013](#) ), qui est basé sur l'algorithme pairwise décrit par [Caussinus et Mestre \(2004\)](#) et un modèle ANOVA à deux facteurs pour la correction. HOMER facilite la comparaison d'ensembles de stations et l'estimation du nombre et des positions de leurs points d'arrêt. Peu d'inhomogénéités temporelles ont été identifiées dans la série (68), et les coefficients obtenus ont été appliqués aux jours ayant des précipitations dans le mois, selon [Vincent et al. \(2002\)](#) .

Nous avons également utilisé les précipitations mensuelles maillées et l' évapotranspiration mensuelle de référence (ETo), à un intervalle de grille de 500 m, obtenues à l'aide de l'équation de [Hargreaves et Samani \(1985\)](#) . Ces ensembles de données maillées étaient basés sur les ensembles de données MOPREDAS et MOTEDAS ( [González-Hidalgo et al., 2011](#) , [González-Hidalgo et al., 2015](#) ), qui sont les ensembles de données climatiques mensuels les plus complets et les plus homogènes pour l'Espagne. Les détails des procédures utilisées pour obtenir et valider ces données maillées ont été décrits par [Vicente-Serrano et al. \(2016\)](#). En utilisant le bassin versant correspondant à chaque station de jaugeage, nous avons déterminé les précipitations mensuelles totales et ETo pour l'ensemble du bassin. Cette procédure a permis de comparer les séries climatiques moyennes (précipitations et ETo) correspondant à l'aire de drainage à chaque station de jaugeage avec les données mensuelles de débit.

#### 3.2 . Une analyse

##### 3.2.1 . Inondations et précipitations extrêmes

Nous avons quantifié les tendances du pourcentage de débit annuel correspondant à des débits fluviaux quotidiens de différentes amplitudes. Pour cela, nous avons utilisé la méthode proposée par [Osborn et al. \(2000\)](#), où les valeurs de débit correspondant à chaque unité du 5e quantile ont été extraites de toutes les données quotidiennes de débit pour chaque station de jaugeage. À l'aide de cette procédure, nous avons classé les relevés de débit quotidiens en 20 catégories. Ensuite, nous avons déterminé la contribution du débit quotidien dans chaque catégorie au débit annuel total et analysé les tendances temporelles de la contribution de chaque catégorie à l'aide du coefficient non paramétrique de Mann – Kendall Tau. Les tendances statistiquement significatives ont été définies comme celles ayant  $p$ -valeurs  $< 0,05$ . Nous avons également utilisé cette approche pour déterminer les changements dans le pourcentage de précipitations annuelles correspondant aux événements au-dessus du 95e quantile. De plus, nous avons analysé les tendances (coefficient tau de Mann–Kendall ; niveau de signification :  $p < 0,05$ ) de la fréquence annuelle des fortes précipitations ( $>95e$ ,  $>99e$  et  $>99,9e$  quantiles) et du débit ( $>95e$ ,  $>98e$ ,  $> 99e$ ,  $>99,5e$ ,  $>99,9e$  et  $>99,95e$  quantiles). Enfin, pour tenir compte de l'influence possible de la capacité du réservoir et du stockage du réservoir en amont des stations de jaugeage situées dans la limite inférieure du bassin, nous avons mis en relation la fréquence annuelle des jours au-dessus des 95e, 99e et 99,9e centiles avec le réservoir annuel moyen stockage, la capacité du réservoir et le rapport entre le stockage et la capacité du réservoir.

### 3.2.2 . Quantification et analyse de la sécheresse

Les sécheresses hydrologiques ont été quantifiées à l'aide du Standardized Streamflow Index (SSI; [Vicente-Serrano et al., 2012](#)), et les sécheresses climatiques ont été quantifiées à l'aide du Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI; [Vicente-Serrano et al., 2010](#)) à des échelles de temps allant de 1 à 48 mois. Le SSI permet de comparer les déficits et excédents de débit dans le temps et dans l'espace, quels que soient l'ampleur de la série et les régimes fluviaux concernés. Le SSI est obtenu en transformant la série de débits mensuels en une série dimensionnelle d'anomalies normalisées. Pour obtenir un SSI fiable qui englobe une grande variabilité dans les propriétés statistiques des données mensuelles de débit, les séries ont été ajustées à la distribution de probabilité la plus appropriée, en fonction de la distance orthogonale minimale entre les moments L de l'échantillon au site *iet* la relation L-moment pour une distribution spécifique, choisie parmi la valeur extrême générale, le Pearson Type III, la log-logistique, la log-normale, la Pareto généralisée et la distribution de Weibull. Plus de détails sur le calcul du SSI sont fournis par [Vicente-Serrano et al. \(2012\)](#).

Le SPEI est un indice de sécheresse climatique qui peut être obtenu à différentes échelles de temps, similaire au Standardized Precipitation Index (SPI) ([McKee et al., 1993](#)); ceci est essentiel pour identifier la réponse complexe des systèmes hydrologiques à la variabilité climatique ([Vicente-Serrano et al., 2011](#), [López-Moreno et al., 2013](#), [Barker et al., 2015](#)). Les sécheresses hydrologiques répondent généralement à différentes échelles de temps de la sécheresse climatique, en fonction des conditions environnementales (par exemple, la lithologie, la couverture végétale et la gestion) ([Lorenzo-Lacruz et al., 2013](#)). Le SPEI est basé sur les précipitations et l'ETo, et intègre la sensibilité de la sévérité de la sécheresse aux changements de l'AED dans la nature multitemporelle des sécheresses sur la base d'un bilan hydrique climatique mensuel ( $P - ETo$ ), qui est ajusté à l'aide d'un logarithme à trois paramètres. -répartition logistique. Les valeurs sont cumulées à différentes échelles de temps, selon la même approche que celle utilisée pour le SPI, et converties en écarts-types par rapport aux valeurs moyennes. Pour cela, nous avons utilisé les précipitations mensuelles totales et les séries maillées ETo correspondant à chaque bassin versant.

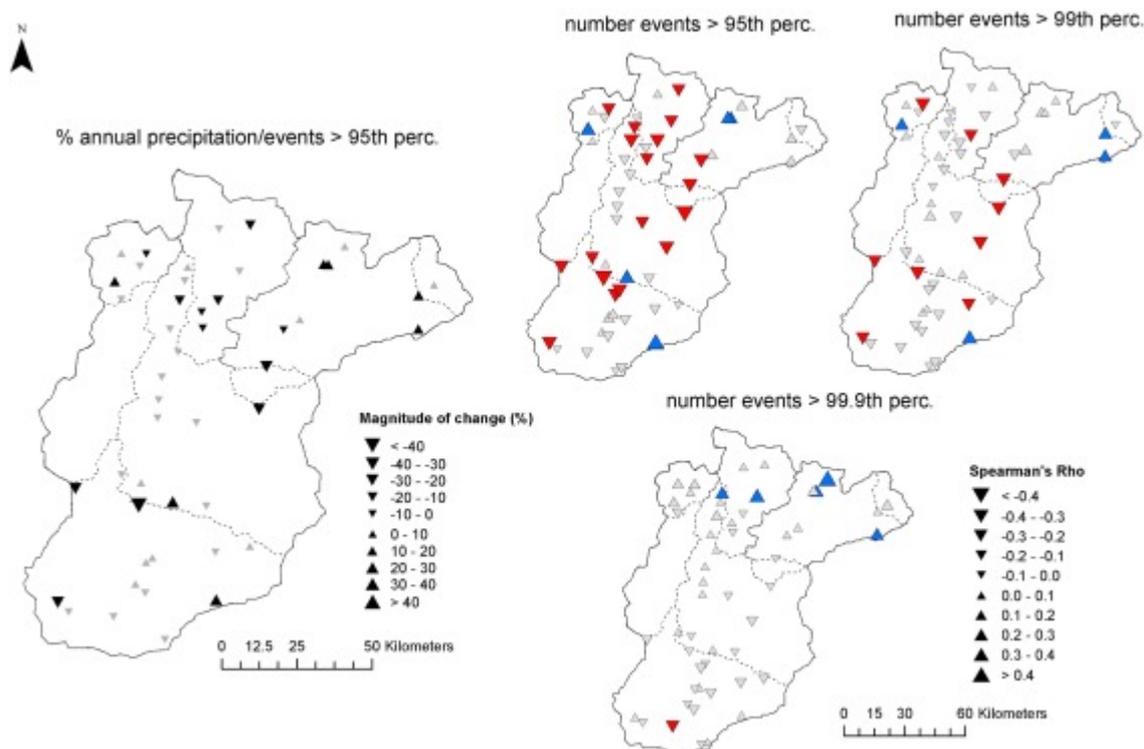
En utilisant le SSI et le SPEI, nous avons défini des événements de sécheresse individuels. Cela se fait généralement en sélectionnant un seuil dans la série ([Fleig et al., 2006](#), [Sharma et Panu, 2014](#)). Pour définir les événements de sécheresse, un niveau seuil qui ne variait pas dans le temps et dans l'espace a été appliqué à la série SSI pour chaque bassin et à la série SPEI. Néanmoins, la réponse des sécheresses hydrologiques à l'occurrence des sécheresses climatiques peut être fortement complexe. Selon les caractéristiques topographiques/lithologiques/de gestion des bassins, les échelles de temps des sécheresses climatiques auxquelles répondent les sécheresses hydrologiques peuvent être très différentes (voir par exemple, [López-Moreno et al., 2013](#), [Lorenzo-Lacruz et al., 2013](#)). Pour cette raison, avant de relier le SSI et le SPEI, nous avons analysé la meilleure échelle de temps SPEI à laquelle le SSI répond. Le seuil sélectionné pour SSI et SPEI était de 0 ; par conséquent, un événement de sécheresse a été enregistré lorsque le SSI ou le SPEI mensuel est tombé en dessous de ce niveau. Sur la base de ce seuil, chaque événement de sécheresse identifié a été caractérisé en fonction de la durée et de l'ampleur de la sécheresse. La durée d'un événement de sécheresse donné a été définie comme une période consécutive et ininterrompue (un ou plusieurs mois), avec une valeur SSI ou SPEI inférieure à 0. L'ampleur de la sécheresse était le volume du déficit accumulé (défini comme la somme des volumes du déficit générées pendant un nombre ininterrompu de mois) délimitant un événement de sécheresse et exprimées comme les déficits cumulés du SSI ou du SPEI. Des séries annuelles de la durée et de l'ampleur moyennes de la sécheresse ont été créées pour chaque bassin selon cette approche. Ici, il convient d'indiquer qu'une sécheresse hydrologique est considérée comme cette période pendant laquelle le débit était inférieur à un seuil donné quantifié en termes relatifs (c'est-à-dire en considérant l'ensemble de la série de débits), indépendamment du fait qu'elle n'est motivée que par des anomalies climatiques, par la régulation de l'eau et abstraction ou les deux.

Les changements dans la durée et l'ampleur de la sécheresse hydrologique et climatique ont également été déterminés par le coefficient non paramétrique de Mann-Kendall Tau. Les tendances statistiquement significatives ont été définies comme celles ayant  $p < 0,05$ . Pour déterminer l'ampleur (quantité) du changement, un modèle de régression linéaire entre le temps (variable indépendante) et la durée/ampleur de la sécheresse a été ajusté. La pente de chaque modèle ( $m$ ) indique l'ampleur du changement. Nous avons également analysé la relation entre le SSI annuel (en tant que mesure de la sévérité annuelle de la sécheresse) et le stockage annuel moyen du réservoir, la capacité du réservoir et le rapport entre le stockage du réservoir et la capacité dans les stations de jaugeage situées dans la limite inférieure du bassin.

## 4 . Résultats

### 4.1 . Événements de précipitations extrêmes

L'évolution des événements de précipitations les plus extrêmes concorde avec la réduction générale des précipitations dans la région, comme indiqué dans les études précédentes. Les tendances du pourcentage des précipitations annuelles correspondant aux événements dépassant le 95e centile n'ont pas montré de structure claire, bien que les stations montrant des tendances négatives aient dominé ( [Fig. 2](#) , à gauche). Cependant, le nombre d'événements dépassant le 95e centile a nettement diminué sur la majeure partie du bassin au cours de la période 1950-2013 ( [Fig. 2](#), droit). Parmi les 52 stations météorologiques utilisées dans cette étude, seules 16 ont montré une tendance positive du nombre d'événements dépassant le 95e centile, avec seulement 5 stations montrant des tendances statistiquement significatives. D'autres stations ont affiché des tendances négatives, avec seulement 18 d'entre elles montrant des tendances statistiquement significatives. À mesure que le seuil de précipitations augmente, la tendance est beaucoup moins claire. Les résultats indiquent qu'un total de 34 stations ont montré une diminution du nombre d'événements dépassant le 99e centile, bien que seulement 9 stations présentent des tendances statistiquement significatives. Ces résultats suggèrent que la tendance a changé de façon marquée lorsque le seuil a été fixé au 99,9e centile. Ceci peut s'expliquer par l'idée que la fréquence annuelle des événements dépassant ce seuil augmente généralement en amont.



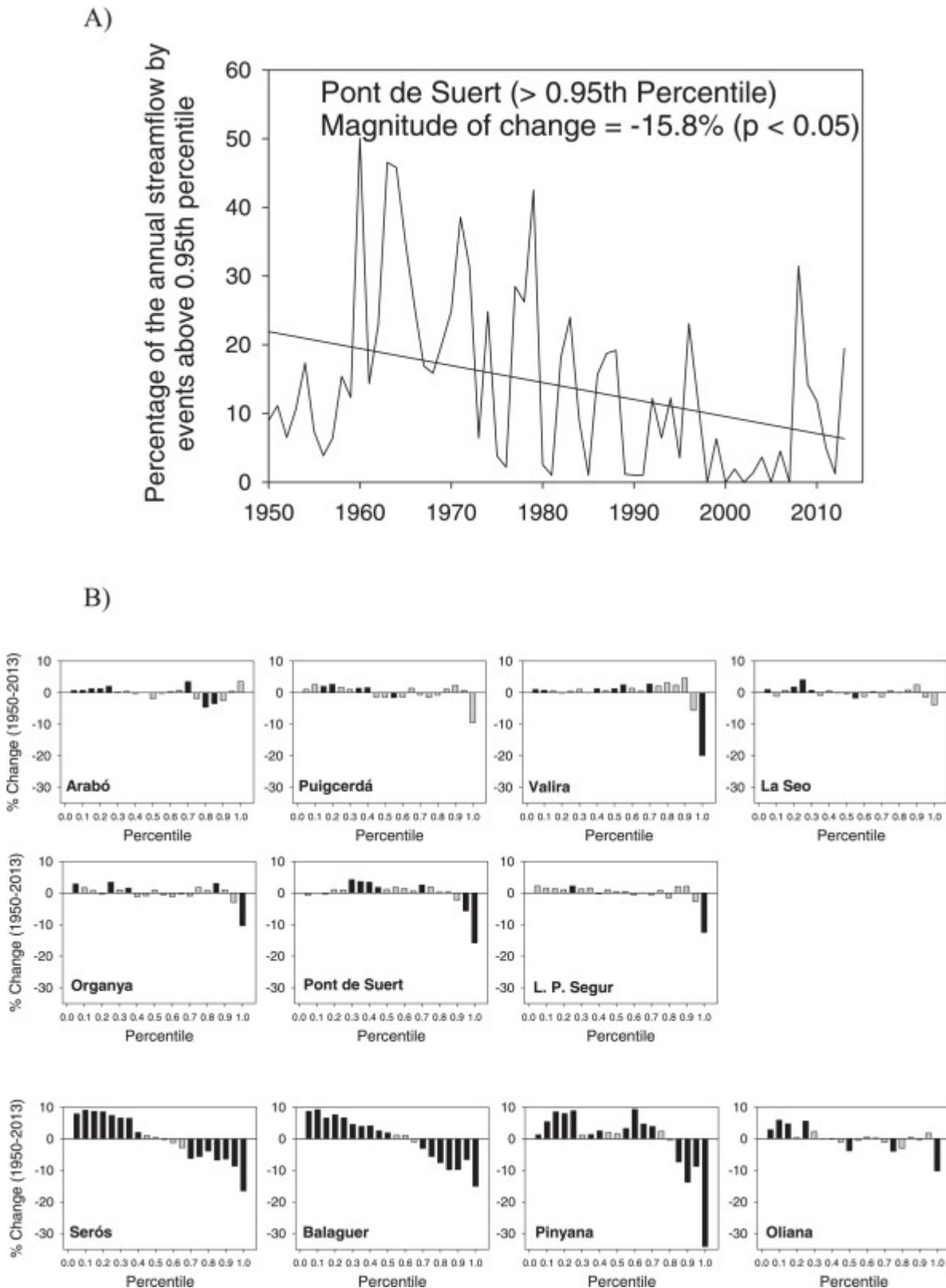
1. [Téléchargement](#) : [Télécharger l'image haute résolution \(363 Ko\)](#)
2. [Télécharger](#) : [Télécharger l'image en taille réelle](#)

Fig. 2 . A gauche : Évolution du pourcentage de précipitations annuelles correspondant aux événements dépassant le 95e centile. Droite : Évolution du nombre d'événements dépassant les 95e, 99e et 99,9e centiles. Rouge : Tendances négatives significatives, Bleu : Tendances positives significatives, Couleur grise : Tendances non significatives.

### 4.2 . Débit élevé de la rivière

Les résultats révèlent une diminution générale du pourcentage de débits associés à des événements quotidiens dépassant le 90e centile dans l'ensemble du bassin. Néanmoins, ce modèle était beaucoup plus évident dans les tronçons inférieurs, en aval des barrages ( [Fig. 3](#)). Pour les stations situées en amont, il n'y a pas eu de changement dans le pourcentage de débit enregistré pour les débits journaliers d'amplitudes inférieures au 90e percentile. Exceptionnellement, seules 4 stations

en amont ont enregistré des changements significatifs du débit journalier pour des événements dépassant le 95e percentile. Pour les stations de jaugeage situées en aval des barrages principaux, le pourcentage du débit associé aux débits quotidiens d'amplitudes inférieures au 50e centile a augmenté, tandis que ceux dépassant le 50e centile ont diminué. Cette tendance indique que, dans les tronçons inférieurs du bassin, il y a eu une augmentation générale de la fréquence des faibles débits. Corrélativement, il y a eu une diminution du débit total associé aux crues, principalement liée à des événements d'une ampleur supérieure au 95e centile.

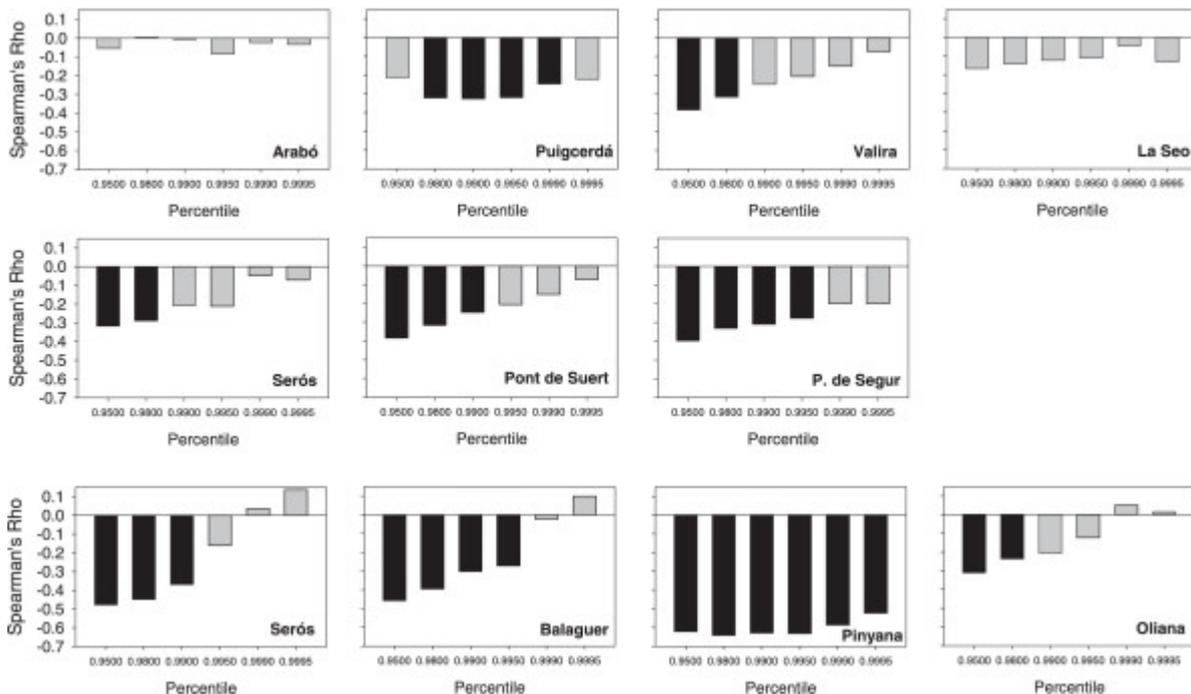


1. [Téléchargement : Télécharger l'image haute résolution \(658 Ko\)](#)
2. [Télécharger : Télécharger l'image en taille réelle](#)

Fig. 3. (A) Exemple d' analyse quantile de quantité correspondant au pourcentage du débit annuel par événements au-dessus de 0,95e centile à Pont de Suert. (B) Parcelles montrant l'ampleur du changement dans les quantiles de quantité

correspondant au volume du débit annuel. Les colonnes noires représentent les tendances significatives. Les quatre parcelles du bas correspondent aux bassins situés en aval des principaux barrages.

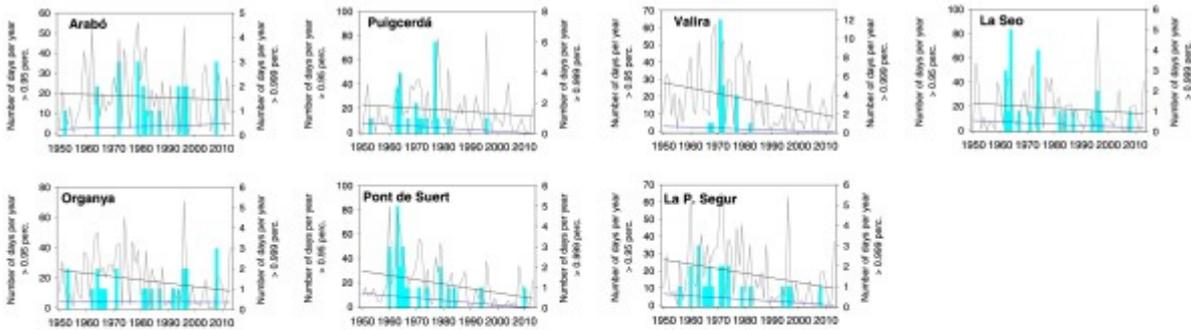
Bien qu'il y ait eu une réduction de la fréquence des événements dépassant le 95e centile ainsi que du débit total de ces événements, il n'y a pas eu de changement dans la fréquence des événements les plus extraordinaires (> 99,5e centile). [Figure 4](#) montre les tendances de la fréquence annuelle des événements dépassant les 95e, 98e, 99e, 99,5e, 99,9e et 99,95e centiles aux différentes stations de jaugeage. Tant pour le cours supérieur que pour le cours inférieur des rivières, il y a eu une réduction de la fréquence des débits quotidiens sous le 98e centile. Cependant, il y avait quelques exceptions dans les eaux d'amont, notamment les stations de jaugeage d'Arabó et de la Seud'Urgell. Néanmoins, l'analyse de la fréquence des crues extraordinaires (c'est-à-dire celles dépassant le 99,5e centile) indique que l'ampleur de la tendance à la baisse est beaucoup plus faible, même si l'évaluation des tendances de la fréquence de ces événements est difficile compte tenu de leur caractère irrégulier et de leur échantillon inégal. Taille. [Figure 5](#) confirme le même constat pour les stations de jaugeage situées en amont et en aval du bassin (Seròs et Balaguer). Comme illustré, il y a une diminution marquée du nombre de débits dépassant le 95e centile dans les cours inférieurs de la rivière Segre (Oliana, Seròs et Balaguer), tandis que la fréquence des événements extraordinaires (> 99,9e centile) n'a montré aucun écart temporel clair. motif. Exceptionnellement, on observe une diminution de la fréquence des crues extrêmes et extraordinaires à Pinyana, qui s'explique par la très forte régulation des eaux et le transfert d'eau vers d'autres bassins. En tout cas, dans les stations de la rivière Segre, il est clairement observé que les débits quotidiens les plus extraordinaires ont montré une faible fréquence et ont été généralement regroupés dans la même année. Ces événements se sont produits pour la plupart avant la vaste régulation fluviale du bassin qui s'est principalement produite pendant la période 1960–1970. Néanmoins, d'autres événements se sont également produits dans les années 1980 et 1990, suite à la construction des principaux barrages du bassin.



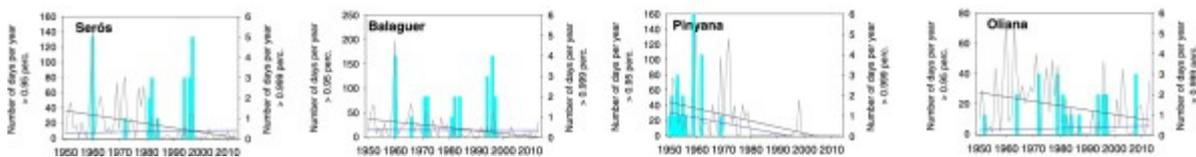
1. [Téléchargement : Télécharger l'image haute résolution \(321 Ko\)](#)
2. [Télécharger : Télécharger l'image en taille réelle](#)

Fig. 4 . Corrélation entre la fréquence des événements dépassant divers centiles (95e, 98e, 99e, 99,5e, 99,9e et 99,95e centiles) et la série chronologique (1950-2013). Les barres noires représentent des corrélations significatives.

## Headwaters



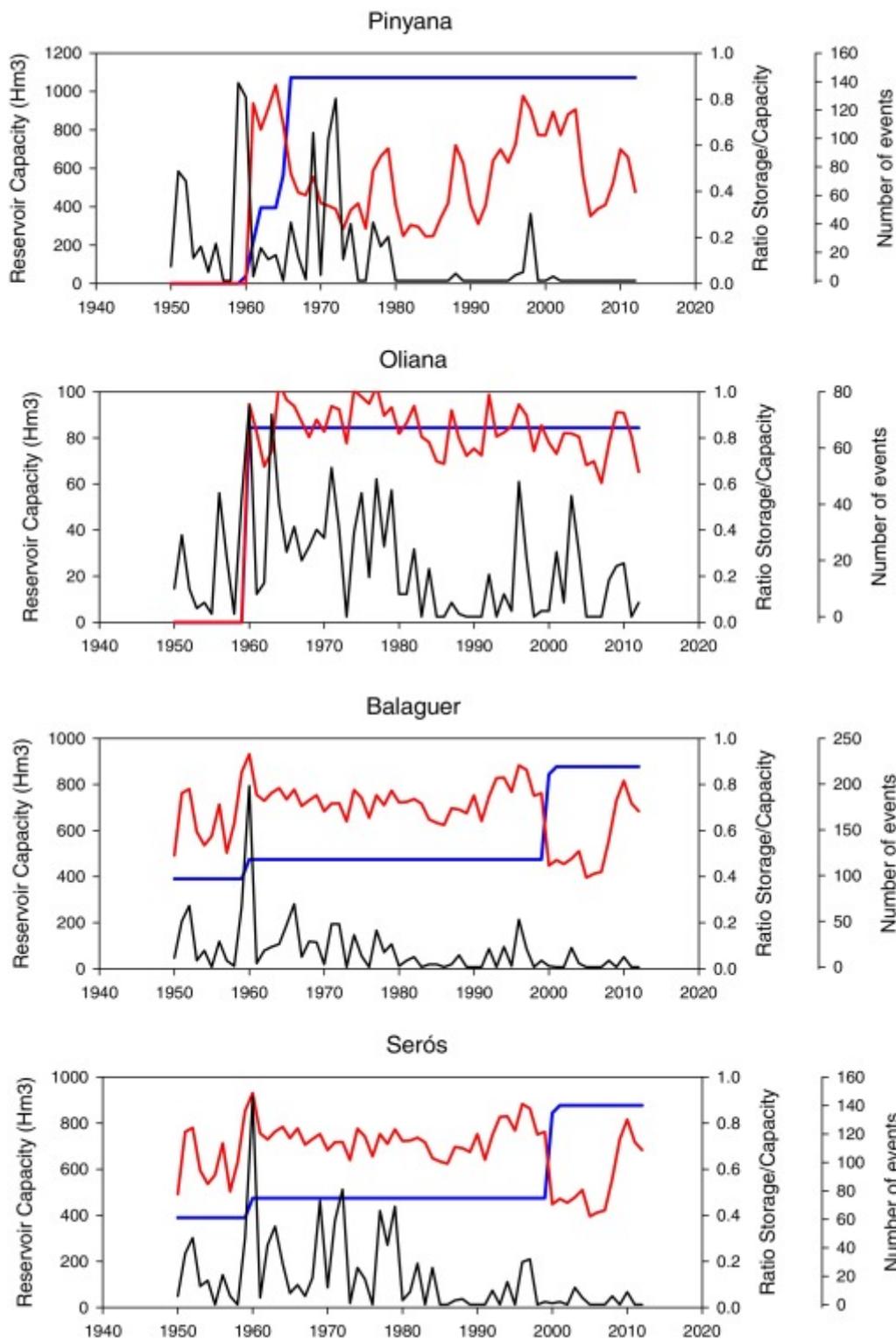
## Low courses



1. Téléchargement : Télécharger l'image haute résolution (520 Ko)
2. Télécharger : Télécharger l'image en taille réelle

Fig. 5 . Évolution du nombre d'événements de débit par an dépassant les 95e (ligne grise) et 99,9e (barres bleues) centiles à chacune des deux stations de jaugeage situées en amont et en aval. Les lignes de tendance sont incluses pour les événements dépassant les 95e (ligne noire) et 99,9e (ligne bleue) centiles.

La régulation accrue dans le bassin a influencé de manière significative la fréquence des inondations extrêmes et extraordinaires. [La Fig. 6](#) montre l'évolution de la capacité de stockage, le rapport entre le stockage annuel de l'eau et la capacité de stockage et la fréquence annuelle des événements supérieurs au 95e centile dans les stations de jaugeage situées en aval du réseau de réservoirs. Les différentes stations de jaugeage ont montré une diminution significative de la fréquence de ces événements, ce qui concorde avec l'augmentation de la capacité de stockage. De plus, la variabilité interannuelle des événements au-dessus du 95ème centile est liée à la variabilité temporelle du rapport stockage/capacité du réservoir ([Tableau 1](#)). Ainsi, au cours des deux dernières décennies, seules les années où les niveaux des réservoirs étaient élevés ont été témoins de certains de ces événements. Le schéma d'évolution des événements au-dessus du 99e centile est assez similaire, mais avec une nette réduction dans les secteurs fluviaux les plus régulés ([Fig. 7](#)). Néanmoins, alors que Pinyana a été exceptionnellement affectée par une forte régulation et transfert d'eau, d'autres stations de jaugeage ont connu une certaine fréquence de ces événements au cours des deux dernières décennies. Compte tenu de la fréquence des crues extraordinaires (>99,9ème), la tendance était moins nette dans les stations de Serós et Balaguer ([Fig. 8](#)), au cours de laquelle des événements de crue extraordinaires ont été identifiés de 1960 à 1990, malgré la régulation des hautes eaux à partir de 1950. Depuis la construction du barrage de Rialb en 2000, aucun événement supérieur au 99,9e centile n'a été identifié. Ce schéma pourrait être lié à la forte diminution des stockages relatifs des réservoirs au cours des années 2000, qui a coïncidé avec les événements de sécheresse climatique les plus extrêmes dans le bassin (voir ci-dessous). Globalement, [Tableau 1](#) démontre clairement comment la fréquence des événements au-dessus du 95e centile est négativement corrélée avec l'évolution de la capacité du réservoir à Balaguer et Serós, bien que cette corrélation diminue avec les événements au-dessus des 99e et 99,9e centiles. Au contraire, la fréquence des trois types d'événements (c'est-à-dire les 95, 99 et 99,9e centiles) est significativement corrélée à l'évolution du rapport stockage/capacité.

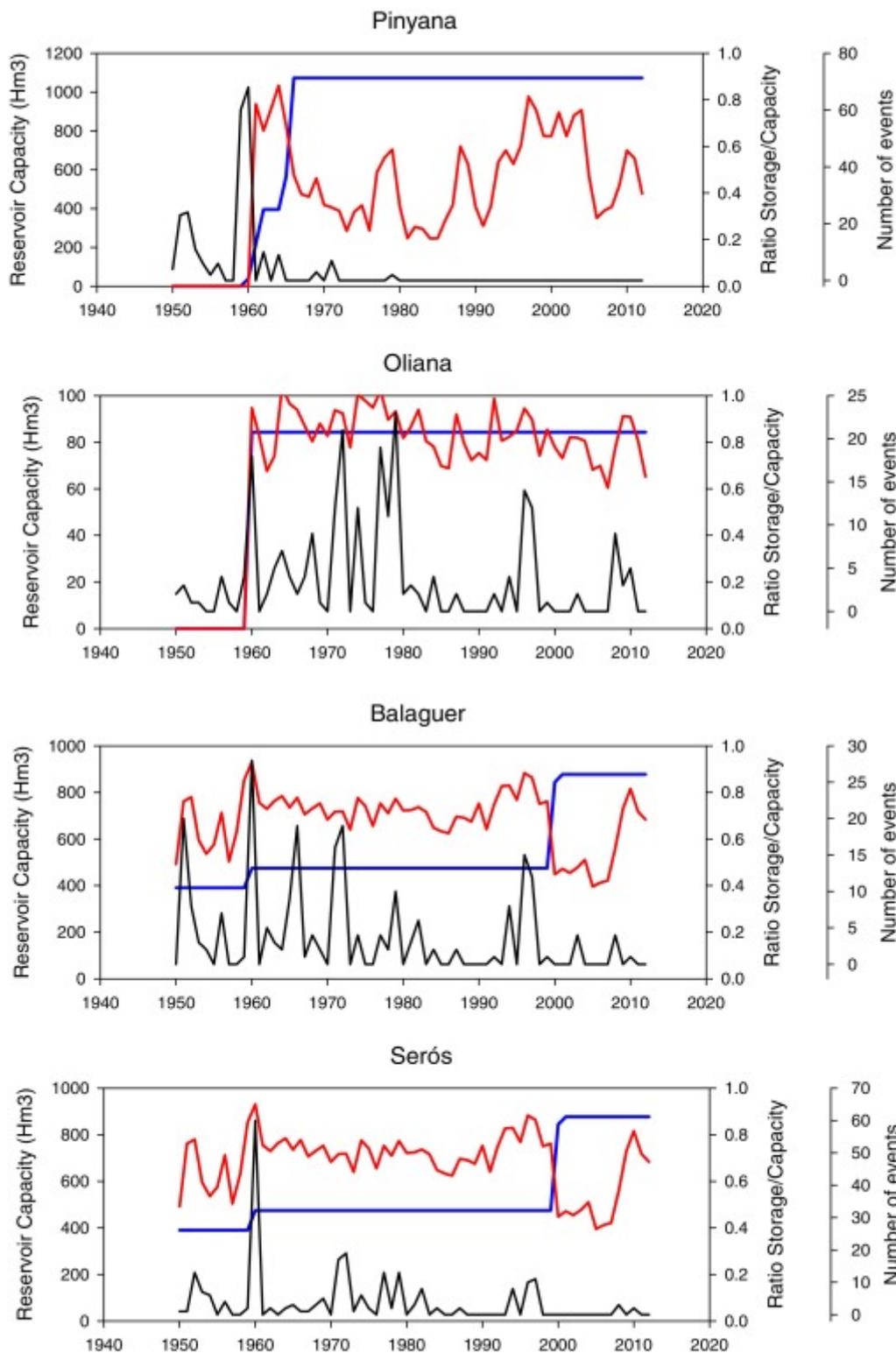


1. [Téléchargement : Télécharger l'image haute résolution \(755 Ko\)](#)
2. [Télécharger : Télécharger l'image en taille réelle](#)

Fig. 6 . Évolution temporelle de la capacité de stockage du réservoir (en bleu), rapport entre le stockage annuel et la capacité (en rouge) en amont des stations de jaugeage situées dans la limite inférieure du fleuve. La ligne noire représente la fréquence annuelle des événements au-dessus du 95e centile.

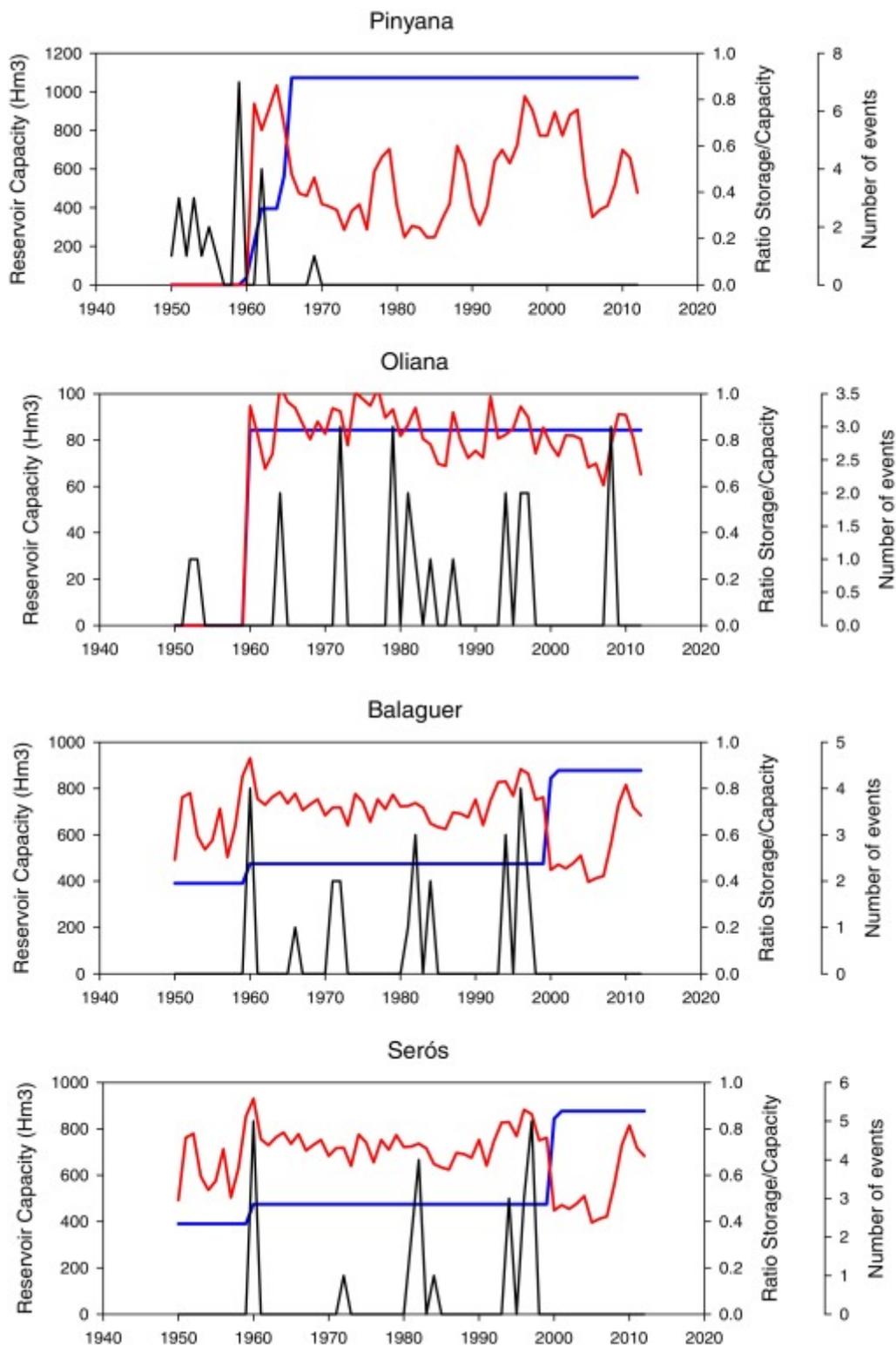
Tableau 1 . Les coefficients  $r$  de Pearson entre la fréquence annuelle des jours avec un débit supérieur aux 95e, 99e et 99,9e centiles et les valeurs annuelles moyennes du stockage du réservoir, la capacité totale du réservoir et le rapport entre le stockage et la capacité en amont des stations de jaugeage situées dans la limite inférieure de le bassin. Les corrélations statistiquement significatives ( $p < 0,05$ ) sont indiquées en gras.

Cellule vide	Pinyana	Oliana	Balaguer	Séros
<b>Fréquence annuelle (événements &gt; 95e)</b>				
Stockage	-0,24	0,19	0,03	0,00
Capacité du réservoir	<b>-0,31</b>	0,03	<b>-0,26</b>	<b>-0,29</b>
Ratio stockage/capacité	0,25	0,19	0,49	0,47
<b>Fréquence annuelle (événements &gt; 99e)</b>				
Stockage	<b>-0,39</b>	<b>0,31</b>	<b>0,03</b>	<b>0,06</b>
Capacité du réservoir	<b>-0,54</b>	0,16	-0,24	-0,19
Ratio stockage/capacité	<b>0,46</b>	<b>0,31</b>	<b>0,45</b>	<b>0,39</b>
<b>Fréquence annuelle (événements &gt; 99,9e)</b>				
Stockage	<b>-0,45</b>	0,17	0,09	0,12
Capacité du réservoir	<b>-0,57</b>	0,10	-0,16	-0,14
Ratio stockage/capacité	-0,22	0,17	<b>0,40</b>	<b>0,40</b>



1. [Téléchargement : Télécharger l'image haute résolution \(732 Ko\)](#)
2. [Télécharger : Télécharger l'image en taille réelle](#)

Fig. 7 . Évolution temporelle de la capacité de stockage du réservoir (en bleu), rapport entre le stockage annuel et la capacité (en rouge) en amont des stations de jaugeage situées dans la limite inférieure du fleuve. La ligne noire représente la fréquence annuelle des événements au-dessus du 99e centile.

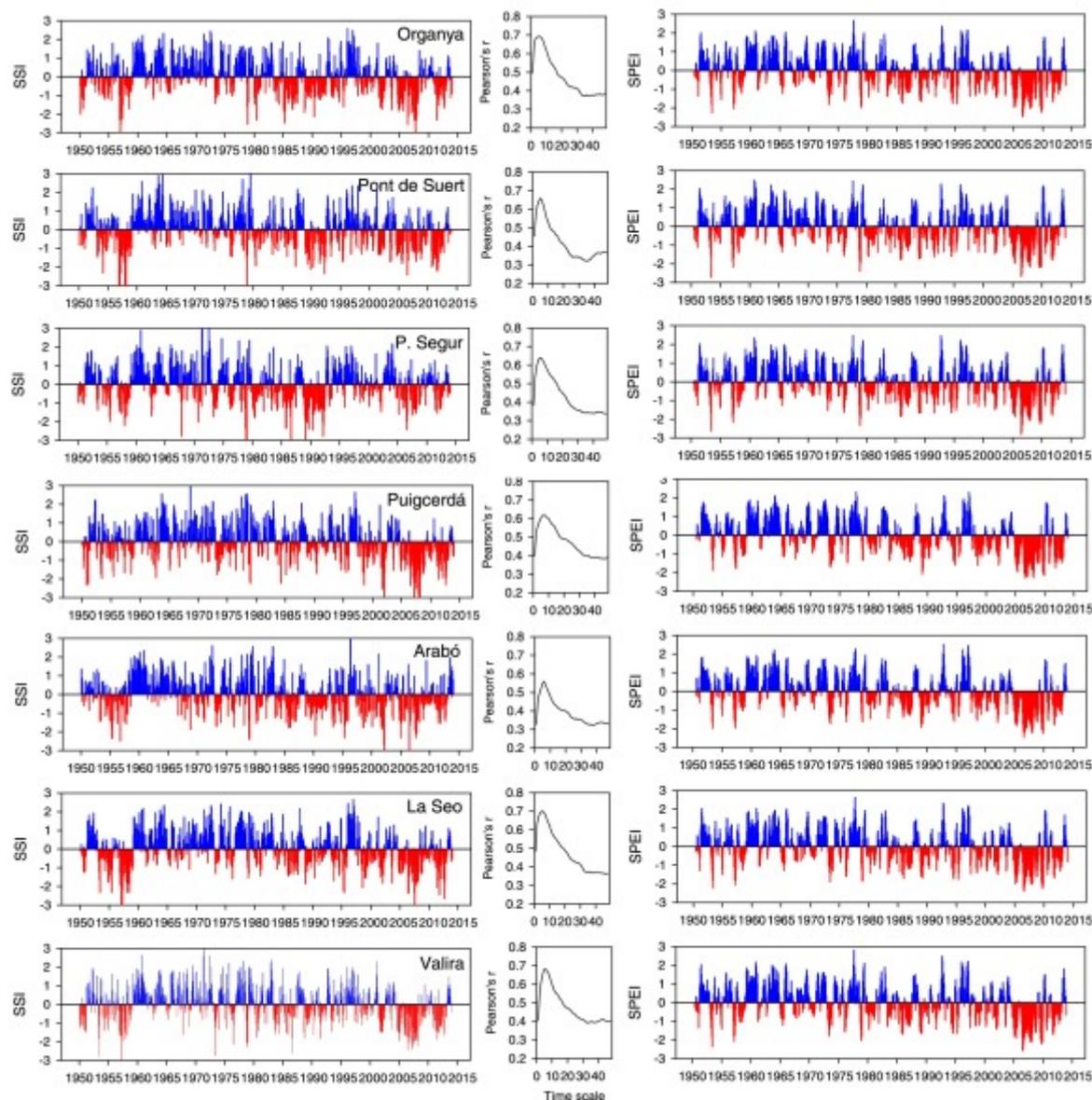


1. [Téléchargement : Télécharger l'image haute résolution \(711 Ko\)](#)
2. [Télécharger : Télécharger l'image en taille réelle](#)

Fig. 8 . Évolution temporelle de la capacité de stockage du réservoir (en bleu), rapport entre le stockage annuel et la capacité (en rouge) en amont des stations de jaugeage situées dans la limite inférieure du fleuve. La ligne noire représente la fréquence annuelle des événements au-dessus du 99,9e centile.

### 4.3 . Sécheresses

La Fig. 9 illustre l'évolution du SSI (indice hydrologique de sécheresse), basé sur les stations de jaugeage en amont du bassin du Segre. En général, les séries de la majorité des stations ont montré des épisodes de sécheresse sévère dans les années 1950, même si les épisodes les plus extrêmes se sont produits au cours des années 2000. Une analyse de corrélation, calculée à différentes échelles de temps, entre le SSI et le SPEI (indice de sécheresse climatique) révèle que les sécheresses hydrologiques étaient corrélées aux sécheresses climatiques dans le cours supérieur à des échelles de temps de 5 à 8 mois. La série SPEI pour chaque sous-bassin correspondait à l'échelle de temps de sécheresse qui présentait la plus forte corrélation avec le SSI. Semblable au SSI, le SPEI a montré que les épisodes de sécheresse les plus extrêmes se sont produits dans les années 2000, en particulier de 2005 à 2010.

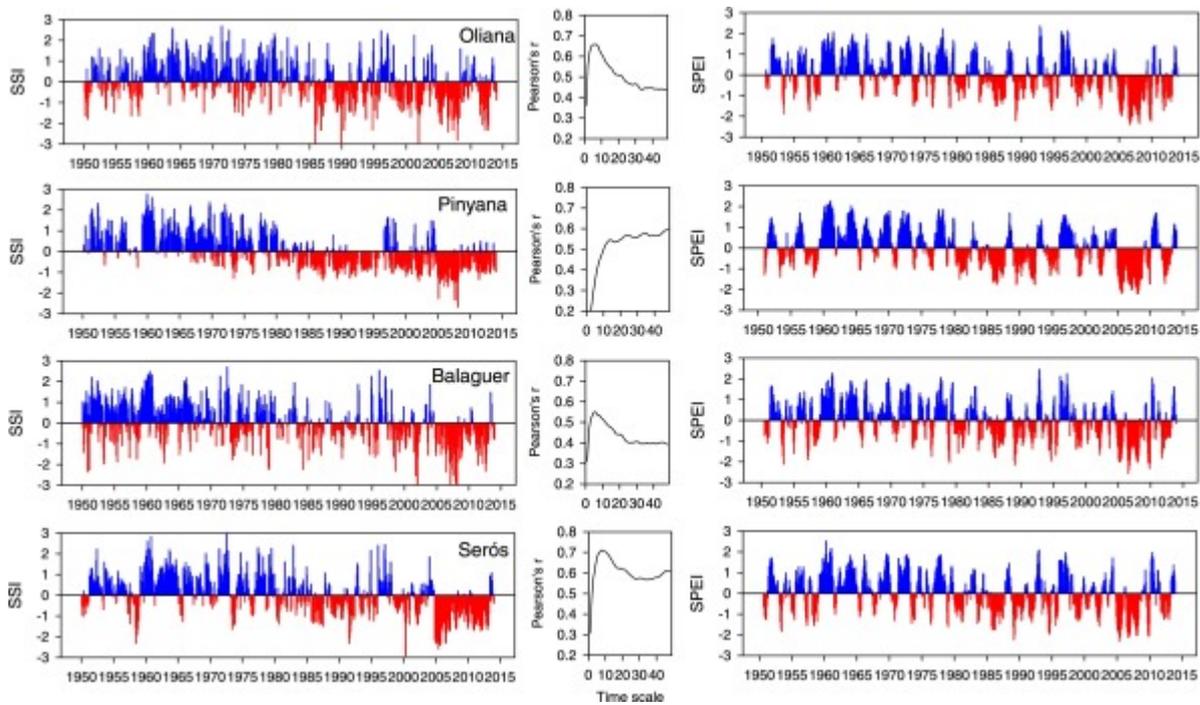


1. [Télécharger](#) : [Télécharger l'image haute résolution \(1 Mo\)](#)

2. [Télécharger](#) : [Télécharger l'image en taille réelle](#)

Fig. 9 . A gauche : Evolution temporelle du SSI dans les stations hydrométriques du cours supérieur. Central : Corrélation entre le SSI et les échelles de temps SPEI de 1 à 48 mois. Droite : Évolution du SPEI à l'échelle de temps avec une corrélation plus élevée.

La Fig. 10 montre la même analyse, mais pour les stations de jaugeage situées en aval des barrages principaux. À ces stations, une diminution marquée des valeurs de SSI a été observée, beaucoup plus prononcée que celle observée pour les eaux d'amont au cours de la période 1950-2013. De plus, l'ampleur des corrélations entre le SSI et le SPEI a diminué à diverses échelles de temps dans les tronçons inférieurs. La corrélation maximale s'est produite pour des échelles de temps SPEI plus longues. Néanmoins, le comportement des sécheresses climatiques dans le cours inférieur est assez similaire à celui observé dans le cours supérieur, les principaux épisodes de sécheresse étant enregistrés dans les années 2000 ; bien qu'ils aient montré une gravité et une durée inférieures par rapport aux sécheresses SSI.

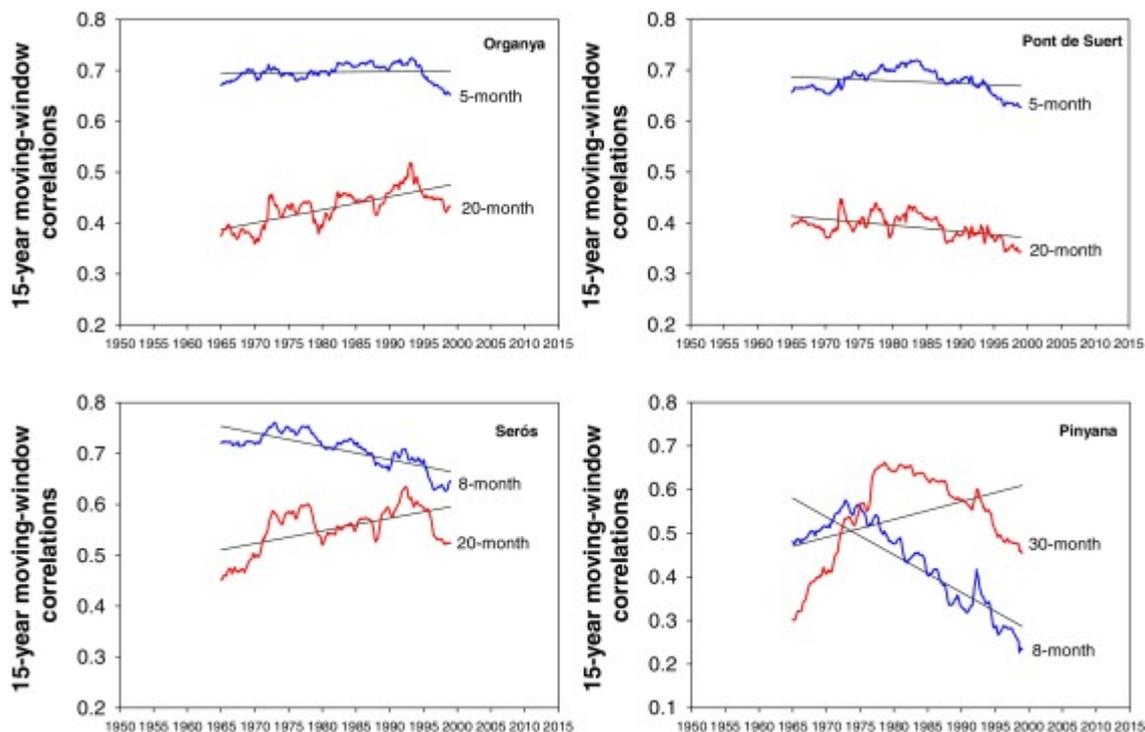


1. [Téléchargement](#) : [Télécharger l'image haute résolution \(723 Ko\)](#)

2. [Télécharger](#) : [Télécharger l'image en taille réelle](#)

Fig. 10 . Gauche : Évolution temporelle du SSI aux stations de jaugeage dans le cours inférieur. Central : Corrélation entre le SSI et les échelles de temps SPEI de 1 à 48 mois. Droite : Évolution du SPEI à l'échelle de temps avec une corrélation plus élevée.

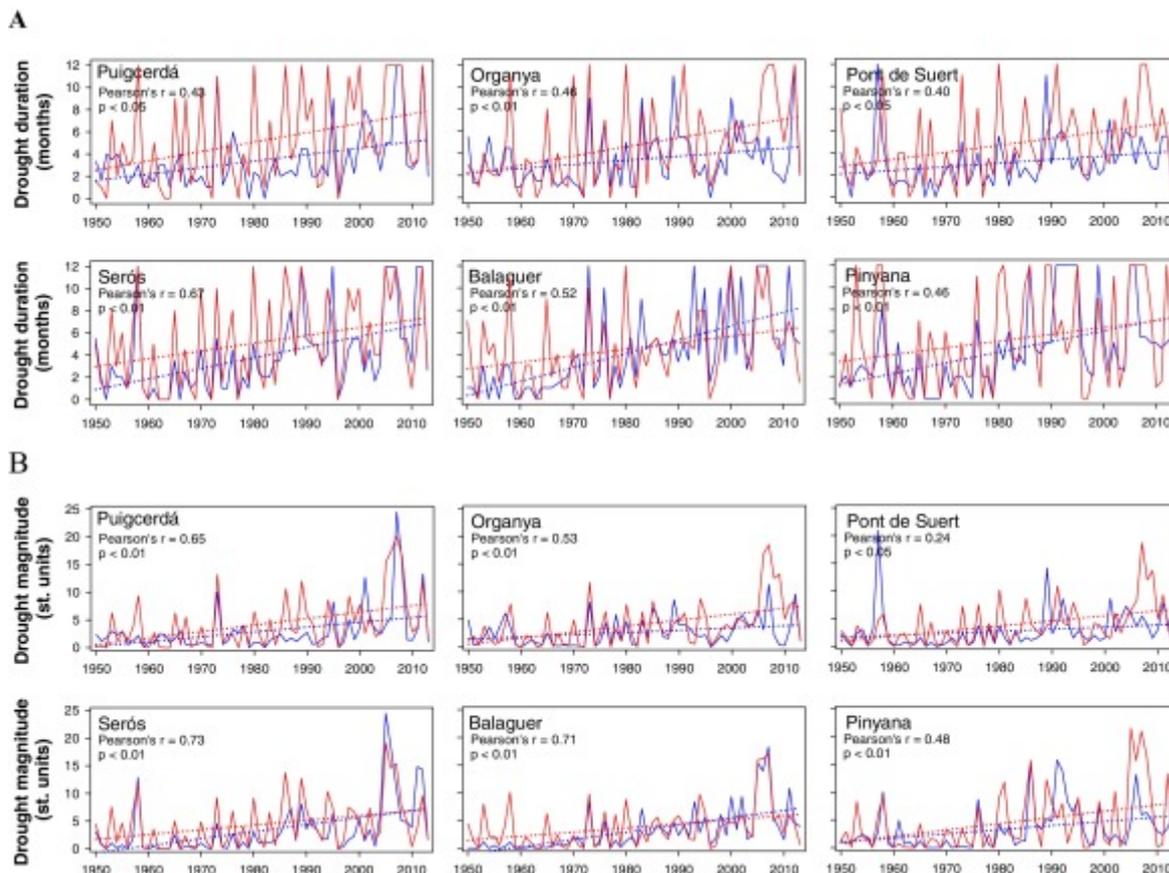
Une réponse intéressante des sécheresses hydrologiques aux sécheresses climatiques a été le changement dans la réponse des sécheresses hydrologiques aux échelles de temps des sécheresses climatiques. Nous avons constaté que l'ampleur du changement était plus importante dans les cours inférieurs que dans les cours supérieurs. Cet aspect a été détecté en appliquant des corrélations de fenêtres mobiles entre les séries SSI et SPEI enregistrées à différentes échelles de temps ( [Fig. 11](#) ). Dans le cours supérieur, il n'y avait pas de tendance vers une diminution de l'ampleur des corrélations entre le SSI et le SPEI à l'échelle de temps de 5 mois, ce qui correspondait aux valeurs de corrélation maximales dans la majorité des séries. Cela s'est clairement manifesté pour les stations d'Organya et de Pont de Suert, ainsi que pour d'autres stations du bassin. En revanche, une comparaison des corrélations entre le SSI et le SPEI à des échelles de temps courtes et longues dans les tronçons inférieurs suggère une tendance vers une réponse moindre aux échelles de temps SPEI courtes et une plus grande réponse aux échelles de temps SPEI longues.



1. Téléchargement : Télécharger l'image haute résolution (379 Ko)
2. Télécharger : Télécharger l'image en taille réelle

Fig. 11 . Évolution des corrélations mobiles sur 30 ans entre le SSI et les échelles de temps SPEI courte (bleue) et longue (rouge) à deux stations de jaugeage dans les eaux d'amont (ci-dessus) et deux stations dans les cours inférieurs (ci-dessous).

Les tendances des sécheresses de plus longue durée et de plus grande ampleur ont été évaluées à la fois pour les zones d'amont et les zones inférieures. [La figure 12](#) montre l'évolution de la durée moyenne annuelle de la sécheresse (en mois) et de son ampleur (en unités standardisées) pour trois stations (Puigcerdà, Organyà et Pont de Suert) situées en amont et trois (Seròs, Balaguer et Pinyana) situées dans le cours inférieur. Pour toutes ces stations, la corrélation entre la durée moyenne annuelle de la sécheresse et son ampleur était positive et statistiquement significative pour les sécheresses hydrologiques et climatiques. Néanmoins, pour les cours supérieurs, nous avons constaté que la tendance était plus forte pour les sécheresses climatiques que pour les sécheresses hydrologiques, alors que l'inverse se produisait pour les cours inférieurs ([Tableau 2](#)). Ainsi, l'évolution de la durée et de l'ampleur annuelles moyennes de la sécheresse dans le cours supérieur a été positive et statistiquement significative pour les sécheresses hydrologiques (SSI) et climatiques (SPEI). Néanmoins, pour les stations limnimétriques d'amont, l'augmentation de l'ampleur et de la durée des épisodes de sécheresse climatique a été bien supérieure à celle observée pour les sécheresses hydrologiques. En revanche, pour les trois stations de jaugeage situées en aval des principaux barrages du bassin (Seròs, Pinyana et Balaguer), l'ampleur et la durée des sécheresses hydrologiques ont augmenté plus que celles observées pour les sécheresses climatiques.



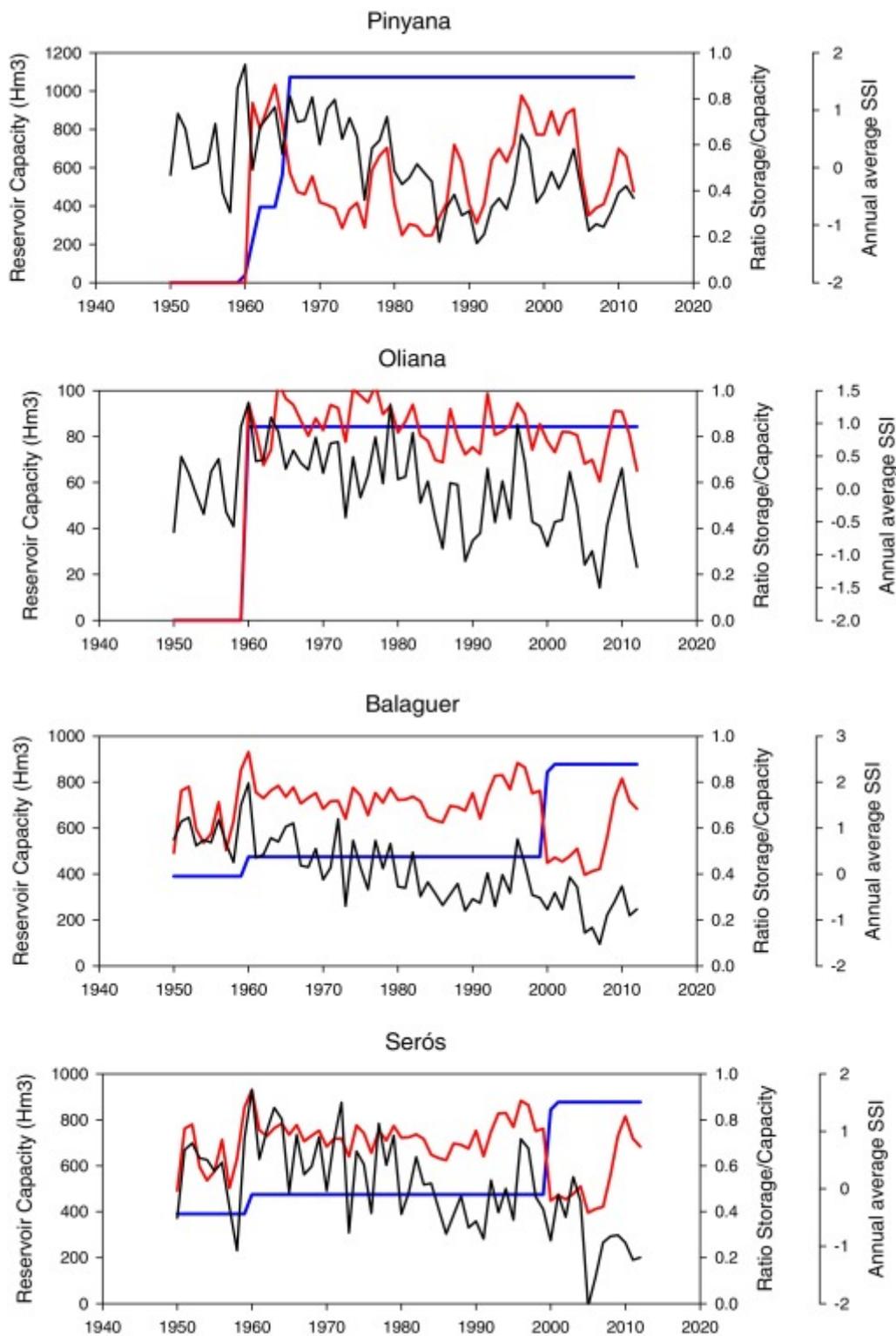
1. Téléchargement : Télécharger l'image haute résolution (967 Ko)
2. Télécharger : Télécharger l'image en taille réelle

Fig. 12 . (A) Évolution de la durée annuelle de la sécheresse (bleu : sécheresses hydrologiques ; rouge : sécheresses climatiques) à trois stations de jaugeage en amont et trois en aval. (B) Évolution de la magnitude annuelle (bleu : sécheresses hydrologiques ; rouge : sécheresses climatiques) à trois stations de jaugeage en amont et trois en aval.

Tableau 2 . Magnitude des tendances de la durée et de l'ampleur de la sécheresse dans le cours supérieur (bleu) et le cours inférieur (orange). Gras : tendances significatives ( $p < 0,05$ ).

	Duration		Magnitude	
	SSI	SPEI	SSI	SPEI
Puigcerdá	3.3	4.0	4.8	6.1
Organya	2.1	4.0	2.2	5.5
Arabó	0.7	3.4	1.3	5.4
La Seo	0.9	3.9	0.9	5.6
Valira	3.0	3.4	3.4	5.1
Pont Suert	1.4	2.9	1.7	4.6
P. Segur	-0.5	3.0	0.2	4.4
Oliana	3.0	2.8	4.4	4.7
Serós	4.5	2.7	6.7	3.9
Pinyana	4.3	2.1	3.4	5.6
Balaguer	6.1	2.3	7.1	3.5

La Fig. 13 montre l'évolution temporelle de la capacité de stockage du réservoir, le rapport entre le stockage annuel et la capacité et le SSI annuel dans les stations de jaugeage situées dans la limite inférieure de la rivière. Les bassins les plus régulés (à savoir Pinyana, Balaguer et Serós) ont montré une corrélation positive et significative avec l'évolution de la capacité du réservoir (Tableau 3). Cette découverte suggère que la sévérité de la sécheresse a augmenté dans la limite inférieure du bassin, en conséquence de la régulation du fleuve. Les résultats révèlent également que le stockage dans les réservoirs est un facteur clé de la gravité de la sécheresse de l'écoulement en aval des réservoirs. En particulier, il existe une corrélation élevée et significative entre les stockages annuels du réservoir et le SSI annuel dans les bassins les plus régulés, démontrant une influence significative de la gestion du réservoir sur l'occurrence des sécheresses hydrologiques en aval.



1. [Téléchargement](#) : [Télécharger l'image haute résolution \(757 Ko\)](#)

2. [Télécharger](#) : [Télécharger l'image en taille réelle](#)

Fig. 13 . Évolution temporelle de la capacité de stockage du réservoir (en bleu), rapport entre le stockage annuel et la capacité (en rouge) en amont des stations de jaugeage situées dans la limite inférieure du fleuve. La ligne noire représente le SSI annuel.

Tableau 3 . Coefficients  $r$  de Pearson entre le SSI annuel et les valeurs annuelles moyennes du stockage du réservoir, la capacité totale du réservoir et le rapport entre le stockage et la capacité en amont des stations de jaugeage situées dans la limite inférieure du bassin. Les corrélations statistiquement significatives ( $p < 0,05$ ) sont indiquées en gras.

Cellule vide	Pinyana	Oliana	Balaguer	Séros
Stockage	-0,13	0,18	<b>-0,30</b>	-0,22
Capacité du réservoir	<b>-0,31</b>	-0,02	<b>-0,61</b>	<b>-0,55</b>
Ratio stockage/capacité	0,28	0,18	<b>0,49</b>	<b>0,56</b>

## 5 . Discussion et conclusions

Nous avons analysé l'évolution des événements extrêmes climatiques et hydrologiques dans le bassin du Segre (nord-est de l'Espagne), où les débits ont été fortement régulés par un réseau dense de réservoirs construits au cours de la seconde moitié du XXe siècle. Entre 1950 et 2013, il y a eu une réduction générale de l'occurrence des événements de précipitations extrêmes dans ce bassin, que cette étude a définis comme ceux dépassant le 95e centile des séries de précipitations. Ce modèle est cohérent avec les analyses antérieures entreprises au niveau national ( [Rodrigo, 2010](#) , [Gallego et al., 2011](#) ) et régional ( [López-Moreno et al., 2010](#) , [Turco et Llasat, 2011](#) ) balances. Ainsi, le pourcentage de précipitations annuelles expliquées par des événements dépassant le 95e centile a généralement diminué, mais à quelques exceptions près où il y a eu une diminution de la fréquence de tels événements. La tendance des événements extraordinaires par an (c'est-à-dire ceux dépassant le 99,9e centile) n'était pas aussi claire. L'analyse de la tendance de ces événements a été difficile car ils se produisent de manière très irrégulière. Des études récentes en Espagne portant sur ces événements n'ont fourni aucune preuve d'une tendance généralisée (par exemple [Acero et al., 2011](#) , [Beguería et al., 2011](#) ). Néanmoins, les eaux d'amont du bassin du Segre ont montré une augmentation de la fréquence des événements de précipitations extraordinaires, alors qu'il n'y a pas eu de changement significatif dans le reste du bassin.

L'évolution du débit aux stations de jaugeage du bassin indique également une réduction générale des crues. Il y a eu une réduction générale du débit annuel depuis les années 1950, bien qu'elle soit plus prononcée dans les zones inférieures du bassin que dans les cours supérieurs ( [Vicente-Serrano et al., 2016](#) ). Néanmoins, le schéma de diminution du débit a été différent entre le cours supérieur et la partie inférieure du bassin. Dans le cours supérieur, il y a eu une réduction générale du volume d'écoulement associé aux événements dépassant le 95e centile. En revanche, il n'y a pas eu de changements majeurs dans le volume associé aux faibles débits. Suite à la construction d'un réseau dense de réservoirs dans les parties basses du bassin, on a observé une augmentation du volume des débits associés aux catégories d'étiage, combinée à une diminution marquée des catégories d'étiage. Ce modèle a été principalement enregistré aux stations de jaugeage Seròs, Balaguer et Pinyana, qui sont situées dans la partie inférieure du bassin du Segre.

Cette étude a également noté une diminution générale du volume associée aux crues au cours des dernières décennies, en particulier dans les versants nord ( [Renard et al., 2008](#) , [Giuntoli et al., 2013](#) ) et sud ( [López-Moreno et al., 2006](#) ) des Pyrénées. Une tendance similaire a également été observée dans d'autres bassins de la péninsule ibérique (par exemple [Silva et al., 2012](#) , [Morán-Tejeda et al., 2012](#) , [Mediero et al., 2014](#) ). Ce schéma peut s'expliquer par la réduction générale des précipitations dans les Pyrénées espagnoles ( [López-Moreno et al., 2010](#) ), et en particulier dans le bassin du Segre ( [Vicente-Serrano et al., 2016](#) ). Cependant, l'augmentation générale de l'activité et du couvert végétal associée à l'abandon des pratiques agricoles dans ces zones de montagne au cours de la seconde moitié du XXe siècle peut également avoir été importante ( [Lasanta et al., 2005](#) , [García-Ruiz et Lana-Renault, 2011](#) ). [Mediero et al. \(2014\)](#) ont lié les changements dans les processus climatiques à la réduction générale des hauts débits dans plusieurs bassins d'Espagne non affectés par les barrages. Ils ont suggéré que les tendances des inondations pourraient également être liées à l'évolution de l'AED, qui a fortement augmenté en Espagne au cours des cinq dernières décennies ( [Vicente-Serrano et al., 2014](#) ). Dans les zones humides, y compris les sources pyrénéennes, une augmentation de l'AED contribuerait à une plus grande transpiration dans les zones à couvert végétal dense, ce qui contribuerait à l'épuisement de la teneur en eau du sol . Ainsi, des études dans des bassins expérimentaux dans les Pyrénées ont montré que la génération de crues est fortement liée aux conditions d'humidité des sols dans les bassins ( [Lana-Renault et al., 2007](#) , [Serrano-Muela et al., 2015](#) ), bien qu'un lien direct le lien entre des anomalies d'inondation particulières et les conditions de température de l'air est difficile à établir.

Les différences marquées entre le cours supérieur et le cours inférieur du bassin en ce qui concerne les tendances de la contribution des débits faibles et élevés au volume annuel du débit sont susceptibles d'être associées à la régulation intense de l'eau pour répondre aux demandes d'approvisionnement en eau des terres irriguées. et les exploitations d'élevage, qui sont les principales activités économiques du bassin. Plusieurs études ont indiqué qu'il y a eu une réduction de l'ampleur des débits élevés associés à la présence de barrages ( [Benke, 1990](#) , [Ligon et al., 1995](#) , [Thoms et Sheldon, 2000](#) , [Song et al.,](#)

[2015](#) , [Bai et al. , 2015](#) ), mais aussi une augmentation de la contribution des étiages ( [Nislow et al., 2002](#) , [Cowell et Stoudt, 2002](#) ). Par exemple, [Maqilligan et Nislow \(2005\)](#) ont analysé l'impact des barrages dans 21 bassins fluviaux aux États-Unis, concluant que, pour les faibles débits, les débits minimums de 1 à 90 jours ont augmenté de manière significative après la mise en eau .

Dans le bassin du Segre, les barrages ont clairement modéré les crues qui se produisent dans le bassin. Cela ressort de l'analyse de la fréquence des débits dépassant certains seuils chaque année. Néanmoins, bien que cette tendance soit évidente pour les seuils correspondant aux 95<sup>e</sup> à 99,5<sup>e</sup> centiles, il n'y a pas eu de réduction de la fréquence des crues extraordinaires. Ce modèle est particulièrement évident dans les eaux d'amont, où les événements de précipitations extraordinaires sont aléatoires dans l'espace et dans le temps, contribuant principalement à la génération d'inondations ( [García-Ruiz et al., 2000](#) ). Ainsi, il y a eu une augmentation générale de la fréquence des événements de précipitations extraordinaires (> 99,9<sup>e</sup> centile) dans le cours supérieur du bassin, ce qui pourrait affecter la fréquence des inondations extraordinaires se produisant dans cette zone. L'explication de l'absence de tendance des crues extrêmes est une piste de recherche future, notamment avec l'augmentation observée de la fréquence des événements pluvieux les plus extrêmes. Cependant, la revégétalisation de certaines parties du bassin, telle que rapportée dans [Piqué et al. \(2016\)](#) , pourrait affecter l' interception de l'eau et l'humidité du sol via l'évapotranspiration, et influencent ainsi la relation entre les précipitations extrêmes et les inondations. Les résultats d'études dans des bassins expérimentaux à travers les Pyrénées occidentales ont habilement validé cette hypothèse ( [Serrano-Muela et al., 2015](#) ).

Fait intéressant,  $r$  , le modèle observé dans les eaux d'amont du bassin de Segre a également été enregistré dans les tronçons inférieurs. Indépendamment de la régulation poussée du bassin depuis les années 1950, des crues extraordinaires ont été enregistrées dans les années 1980 et 1990, conséquence de la reconstruction des principaux réservoirs du bassin. Cette exception est représentée dans la station Pinyana, qui a été affectée par un niveau élevé de régulation de l'eau et un transfert d'eau vers l'amont. Basé sur une perspective temporelle de plusieurs siècles, [Barrera-Escoda et Llasat \(2015\)](#) ont suggéré que les inondations dans le bassin de Segre n'ont pas diminué au cours de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle. Nos résultats suggèrent que les réservoirs du bassin de Segre ont eu une influence marquée sur la régulation des crues ordinaires et extraordinaires, mais la capacité du réseau de réservoirs à réduire les crues extraordinaires peut dépendre d'un grand nombre de facteurs, notamment la capacité des réservoirs et le stockage et les règles d'exploitation du barrage. À l'aide de diverses études de cas basées sur de petits réservoirs en Europe, [Salazar et al. \(2012\)](#) ont analysé l'efficacité des mesures de gestion des inondations, démontrant que ces réservoirs sont efficaces pour réduire l'ampleur en aval des petits et moyens événements, mais n'ont presque aucun effet sur les crues les plus importantes. Des résultats similaires ont été trouvés dans d'autres études (par exemple [Smith et al., 2010](#) ). Dans le bassin de Segre, il est probable que les réservoirs réduiraient l'ampleur des crues extrêmes, car leur capacité de stockage est très élevée. Néanmoins, d'autres facteurs physiographiques et climatiques pourraient également jouer un rôle important.

Les bassins du nord-est de l'Espagne sont affectés par des pluies torrentielles en réponse à divers mécanismes atmosphériques ( [Llasat et Puigcerver, 1997](#) ). Des événements de précipitations extrêmes peuvent survenir après des périodes de précipitations importantes, générant de grands volumes de ruissellement de surface, en particulier lorsque le sol est saturé ( [Lana-Renault et al., 2007](#) , [García-Ruiz et al., 2005](#) , [García-Ruiz et al., 2008](#) ). De nombreuses études ont montré que les conditions climatiques annuelles et/ou saisonnières peuvent fortement affecter la capacité des réservoirs à gérer les crues les plus importantes. [Moran-Tejeda et al. \(2012\)](#) ont étudié cette question dans le bassin du Douro (centre de l'Espagne), concluant que pour la plupart des réservoirs, le niveau d'altération des débits était fortement corrélé au volume d'afflux annuel. Un exemple représentatif est celui des réservoirs, qui n'ont pas été régulés de manière excessive, pendant les années d'apports d'eau relativement élevés. De plus, [López-Moreno et al. \(2002\)](#) ont indiqué que l'influence du réservoir de Yesa sur les crues en aval dans le bassin d'Aragon (les Pyrénées occidentales) dépend largement du niveau de stockage de l'eau. Ainsi, ils ont noté que lorsque le barrage était à plus de 90% de sa capacité, il n'y avait presque pas de contrôle des crues, et des débits de pointe encore plus élevés pouvaient se produire en aval en raison des libérations soudaines de l'eau nécessaire à la sécurité du barrage. Ces résultats mettent en évidence les difficultés de gestion des crues dans des bassins méditerranéens très complexes, dont celui du Sègre, où la variabilité climatique se superpose à différentes échelles temporelles (du journalier à l'annuel) pour déterminer l'occurrence des événements de crue.

Cette étude indique que la construction de réservoirs et les utilisations de l'eau dans le bassin de Segre ont eu un impact sur la fréquence, la durée et la gravité des sécheresses hydrologiques en aval des principaux barrages. Il y a eu une augmentation des sécheresses hydrologiques associée à l'évolution observée des sécheresses climatiques, ce qui est cohérent avec le schéma général trouvé pour la péninsule ibérique ( [Vicente-Serrano et al., 2014](#) ). Cette étude suggère un haut niveau de concordance entre l' évolution temporelle des indices de sécheresse climatique et hydrologique dans le bassin de Segre. Ainsi, les deux enregistrements ont indiqué que les événements de sécheresse les plus graves se sont produits dans les années 2000, conformément aux observations dans d'autres bassins du nord-est de l'Espagne ( [López-Bustins et al., 2013](#) ). Néanmoins, la réponse des sécheresses hydrologiques aux sécheresses climatiques diffère sensiblement entre

les cours supérieurs et les zones inférieures du bassin. Dans le cours supérieur, les sécheresses hydrologiques réagissent principalement aux courtes périodes de sécheresse climatique, ce qui est une caractéristique des zones ayant une capacité limitée de stockage de l'eau ainsi qu'une réponse rapide du débit à la variabilité des précipitations ( [López-Moreno et al., 2013](#) , [Barker et al., 2015](#) ). En revanche, dans les zones basses du bassin, la réponse des sécheresses hydrologiques s'est produite à des échelles de temps de sécheresse climatique plus longues, en raison de la forte capacité de stockage de l'eau en amont. Ce modèle est également une caractéristique d'autres régions de la péninsule ibérique, où la construction de barrages a clairement modifié les échelles de temps de réponse des sécheresses hydrologiques à la variabilité climatique ( [Vicente Serrano et López-Moreno, 2005](#) , [Lorenzo-Lacruz et al., 2010](#) , [López-Moreno et al., 2013](#) ). Ainsi, l'augmentation de la régulation des débits fluviaux dans le bassin du Segre a considérablement modifié les échelles de temps de réponse des sécheresses hydrologiques aux sécheresses climatiques. Bien qu'il y ait eu un changement significatif dans la corrélation entre les sécheresses hydrologiques et climatiques à différentes échelles de temps dans les cours supérieurs, il y a eu une nette augmentation de l'influence des longues échelles de temps de sécheresse climatique dans les zones inférieures du bassin, et par conséquent une réduction de la influence des courtes périodes de sécheresse climatique ; ceci est cohérent avec l'augmentation de la capacité de stockage dans le bassin.

De nombreuses études avaient souligné le potentiel de la régulation de l'eau pour réduire la sévérité des sécheresses, basée sur la capacité de stockage de l'eau ( [Yeh et Becker, 1982](#) , [McMahon et al., 2006](#) ). Cette approche est applicable dans le bassin du Segre, où un important réseau de réservoirs garantit l'approvisionnement en eau de grandes superficies irriguées dans les parties inférieures du bassin. Néanmoins, dans quelques cas, le réseau du bassin du Segre n'a pas réussi à répondre de manière adéquate aux demandes d'eau pour l'irrigation. Un exemple représentatif est celui des épisodes de sécheresse les plus extrêmes survenus au cours des années 2000.

Néanmoins, d'un point de vue hydrologique, le système de régulation des eaux ne semble pas aussi efficace pour gérer les sécheresses hydrologiques. Dans le cours supérieur du bassin du Segre, l'augmentation de la durée et de l'ampleur des sécheresses hydrologiques a été moindre par rapport aux sécheresses climatiques. Cela était probablement dû à la capacité des eaux d'amont des montagnes à diviser les sécheresses climatiques de longue durée en réponse à des événements de précipitations intenses de courte durée. En revanche, dans les zones basses du bassin, la tendance inverse a été observée, avec une augmentation marquée de la durée et de l'ampleur des sécheresses hydrologiques par rapport à celles des sécheresses climatiques. Dans le bassin du Segre, il y a eu une forte diminution du débit, en raison de la récente diminution des précipitations et de l'augmentation de l'AED. Cependant, [Vicente-Serrano et al., 2016](#) ).

La forte demande en eau pour l'agriculture, les usages urbains et touristiques dans la péninsule ibérique a fait de l'accentuation des sécheresses hydrologiques en aval des grands systèmes de réservoirs une pratique de gestion courante. Cette caractéristique a déjà été observée dans le bassin du Douro ( [Morán-Tejeda et al., 2012](#) ) et le cours supérieur ( [Lorenzo-Lacruz et al., 2010](#) ) et le cours inférieur ( [López-Moreno et al., 2009](#) ) du bassin du Tage. L'objectif de la gestion des réservoirs dans n'importe quel bassin est principalement de fournir de l'eau pour diverses utilisations, en plus de libérer de l'eau dans les rivières. En raison de la nécessité de répondre aux demandes des usagers de l'eau, le débit de base dans la plupart des rivières régulées est beaucoup plus faible que celui des rivières à débit naturel ( [Ibáñez et al., 1996](#) , [Batalla et al., 2004](#) ). Cette caractéristique explique en grande partie l'augmentation observée des sécheresses hydrologiques en aval des grands barrages, ce qui augmente la capacité de régulation de l'eau pour alimenter les terres irriguées, les zones urbaines et les élevages. Cette situation est exacerbée pendant les périodes de sécheresse climatique extrême, comme celles qui ont affecté le bassin du Segre en 2007-2009, lorsque l'approvisionnement en ressources en eau disponibles pour les différents utilisateurs de l'eau était prioritaire sur les débits. Cependant, la réduction du débit ne peut pas affecter un débit environnemental minimum, établi par les lois environnementales en vigueur en Espagne.

## Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence météorologique espagnole (AEMET) et MeteoCat d'avoir fourni les données climatiques et la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) d'avoir fourni les données hydrologiques utilisées dans cette étude. Ce travail a été soutenu par le projet de recherche PCIN-2015-220, CGL2014-52135-C03-01, *Red de variabilidad y cambioclimático* RECLIM (CGL2014-517221-REDT) financé par la Commission espagnole de la science et de la technologie et FEDER, "LIFE12 ENV /ES/000536-Démonstration et validation d'une méthodologie innovante pour l'adaptation régionale au changement climatique dans la région méditerranéenne (LIFE MEDACC) » financé par le programme LIFE de la Commission européenne et IMDROFLOOD financé par l'appel cofinancé Water Works 2014 de la Commission européenne. Marina Peña-Gallardo et Esteban Alonso-González ont été accordées par le ministère espagnol de l'Économie et de la Compétitivité ; Natalia Martin-Hernandez a été soutenue par une bourse de doctorat du gouvernement régional d'Aragón ; et Miquel Tomas-Burguera a reçu une bourse de doctorat du Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Arturo Sanchez-Lorenzo a été soutenu par une bourse postdoctorale JCI-2012-12508 financée par le ministère espagnol de l'Économie et de la Compétitivité.

## Annexe A . Données supplémentaires

Voici les données complémentaires à cet article : [Télécharger : Télécharger le fichier Keyhole Markup \(3KB\)](#)

### Références

[Acéro et al., 2011](#)

FJ Acero , JA García , MC Gallego

**Étude des pics au-dessus du seuil des tendances des précipitations extrêmes sur la péninsule ibérique**

J. Climat , 24 ( 2011 ) , pp. 1089 - 1105

[Afficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Alexandre et al., 2006](#)

LV Alexander , X. Zhang , TC Peterson , J. Caesar , B. Gleason , AMG Klein

Tank , M. Haylock , D. Collins , B. Trewin , F. Rahimzadeh , A. Tagipour , K. Rupa

Kumar , J. Revadekar , G. Griffiths , L. Vincent , DB Stephenson , J. Burn, E. Aguilar , M. Brunet , M. Taylor , M. New , P. Zhai , M. Rusticucci , JL Vazquez-Aguirre

**Changements mondiaux observés dans les extrêmes climatiques quotidiens de température et de précipitations**

J. Geophys. Rés. Atmos. , 111 ( 2006 )

AN D05109

[Google Scholar](#)

[Alain, 2012](#)

RP Allan

**Le rôle de la vapeur d'eau dans les flux d'énergie de la Terre**

Surv. Géophys. , 33 ( 2012 ) , p. 557 - 564

[Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Arbiol et al., 1984](#)

R. Arbiol , J. Calvet , O. Viñas

**Détection par satellite Landsat-4 de los efectos de la riada del 8-11-82 en el río Segre**

Acta Géol. Hisp. , 19 ( 1984 ) , p. 235 - 284

[Afficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Bai et al., 2015](#)

P. Bai , X. Liu , K. Liang , C. Liu

**Enquête sur les changements de la crue maximale annuelle dans le bassin du fleuve Jaune, Chine**

Quat. Int. , 392 ( 2016 ) , p. 168 - 177

[ArticleTélécharger le PDFAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Barker et al., 2015](#)

LJ Barker , J. Hannaford , A. Chiverton , C. Svensson

**De la sécheresse météorologique à la sécheresse hydrologique à l'aide d'indicateurs standardisés**

Hydrol. Terre Syst. Sci. Discuter. , 12 ( 2015 ) , p. 12827 - 12875

[Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Barrera-Escoda et Llasat, 2015](#)

A. Barrera-Escoda , MC Llasat

**Évolution des régimes d'inondation dans une région méditerranéenne (1301-2012) et facteurs climatiques - le cas de la Catalogne**

Hydrol. Terre Syst. Sci. , 19 ( 2015 ) , p. 465 - 483

[\\_Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Barriendos et al., 2003](#)

M. Barriendos , D. Coeur , M. Lang , MC Llasat , R. Naulet , F. Lemaitre , A. Barrera

**Analyse de stationnarité des séries historiques d'inondations en France et en Espagne (XIVe-XXe siècles)**

Nat. Dangers Terre Syst. Sci. , 3 ( 2003 ) , p. 583 - 592

[\\_Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Batalla et al., 2004](#)

RJ Batalla , CM Gómez , GM Kondolf

**Changements hydrologiques induits par les réservoirs dans le bassin de l'Èbre (nord-est de l'Espagne)**

J. Hydrol. , 290 ( 2004 ) , p. 117 - 136

[ArticleTélécharger le PDFAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Beguería et al., 2009](#)

S. Beguería , SM Vicente-Serrano , JI López-Moreno , JM García-Ruiz

**Cartographie annuelle et saisonnière de l'intensité maximale, de l'ampleur et de la durée des événements de précipitations extrêmes sur un gradient climatique, nord-est de l'Espagne**

Int. J. Climatol. , 29 ( 2009 ) , p. 1759 - 1779

[\\_Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Beguería et al., 2011](#)

S. Beguería , M. Angulo-Martínez , SM Vicente-Serrano , JI López-Moreno , A. El-Kenawy

**Évaluation des tendances de l'intensité et de l'ampleur des événements de précipitations extrêmes à l'aide d'une analyse des pics non stationnaires au-dessus du seuil : une étude de cas dans le nord-est de l'Espagne de 1930 à 2006**

Int. J. Climatol. , 31 ( 2011 ) , p. 2102 - 2114

[\\_Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Benke, 1990](#)

AC Benké

**Une perspective sur les courants en voie de disparition de l'Amérique**

JN Am. Benthol. Soc. , 9 ( 1990 ) , p. 77 - 88

[\\_Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeGoogle Scholar](#)

[Braun-Blanquet et Bolòs, 1958](#)

J. Braun-Blanquet , O. Bolòs

**Les groupements végétaux du bassin moyen de l'Ebre et leur dynamisme**

Un. Est. Exp. Aula Dei , 5 ( 1-4 ) ( 1958 ) , p. 1 - 266

[Google Scholar](#)

[Buendia et al., 2015](#)

C. Buendia , RJ Batalla , S. Sabater , A. Palau , R. Marcé

**Tendances du ruissellement induites par le climat et le boisement dans un bassin pyrénéen**

Dégradation des terres. Dév. ( 2015 )

[Google Scholar](#)

[Coll et al., 2016](#)

JR Coll , E. Aguilar , M. Prohom , J. Sigró

**Variabilité et tendances à long terme de la sécheresse à Barcelone (1787–2014)**

Cuad. Enquête Géogr. , 42 ( 2016 ) , p. 29 - 48

[Recherche de PDF...](#)

This article is free to access.

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Cowell et Stoudt, 2002](#)

CM Cowell , RT Stoudt

**Modifications induites par les barrages des régimes d'écoulement du cours supérieur de la rivière Allegheny et leurs implications pour la biodiversité**

Confiture. Ressource en eau. Assoc. , 38 ( 2002 ) , p. 187 - 196

[Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Caussinus et Mestre, 2004](#)

H. Caussinus , O. Mestre

**Détection et correction des décalages artificiels dans les séries climatiques**

J.Roy. Statistique Soc. Ser. , C53 ( 2004 ) , p. 405 - 425

[Afficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Crooks et Kay, 2015](#)

SM Crooks , AL Kay

**Simulation du débit d'une rivière dans la Tamise sur 120 ans : preuve d'un changement dans la réponse pluie-débit ?**

J. Hydrol. Rég. Étalon. , 4 ( 2015 ) , p. 172 - 195

[ArticleTélécharger le PDFAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Daï, 2013](#)

A. Daï

**Augmentation de la sécheresse sous le réchauffement climatique dans les observations et les modèles**

Nat. Clim. Changement , 3 ( 2013 ) , p. 52 - 58

[Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Dittus et al., 2015](#)

AJ Dittus , DJ Karoly , SC Lewis , LV Alexander

**Une évaluation multirégionale des changements observés dans l'étendue géographique des extrêmes de température et de précipitations**

J. Climat , 28 ( 2015 ) , pp. 9206 - 9220

[Afficher l'enregistrement dans Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Fleig et al., 2006](#)

AK Fleig , LM Tallaksen , H. Hisdal , S. Demuth

**Une évaluation globale des caractéristiques de la sécheresse de l'écoulement fluvial**

Hydrol. Terre Syst. Sci. , 10 ( 2006 ) , p. 535 - 552

[Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Gallego et al., 2011](#)

MC Gallego , RM Trigo , JM Vaquero , M. Brunet , JA García , J. Sigró , MA Valente

**Tendances des indices de fréquence des précipitations journalières sur la péninsule ibérique au cours du siècle dernier**

J. Geophys. Rés. Atmos. , 116 ( 2011 )

AN D02109

[Google Scholar](#)

[García-Ruiz et al., 2000](#)

JM García-Ruiz , J. Arnáez , SM White , A. Lorente , S. Beguería

**Évaluation de l'incertitude dans la prévision des événements pluviométriques extrêmes : un exemple dans les Pyrénées centrales espagnoles**

Hydrol. Traiter. , 14 ( 2000 ) , p. 887 - 898

[Afficher l'enregistrement dans Scopus](#)[Google Scholar](#)

[García-Ruiz et al., 2005](#)

JM García-Ruiz , J. Arnáez , S. Beguería , M. Seeger , C. Martí-Bono , D. Regüés , N. Lana-Renault , S. White

**Production de ruissellement dans un bassin versant intensément perturbé et abandonné, Pyrénées espagnoles centrales**

Catena , 59 ( 2005 ) , p. 79 - 92

[ArticleTélécharger le PDF](#)[Afficher l'enregistrement dans Scopus](#)[Google Scholar](#)

[García-Ruiz et al., 2008](#)

JM García-Ruiz , D. Regüés , B. Alvera , N. Lana-Renault , P. Serrano-Muela , E. Nadal-Romero , A. Navas , J. Latron , C. Martí-Bono , J. Arnáez

**Génération de crues et transport sédimentaire dans des bassins versants expérimentaux affectés par les changements d'affectation des terres dans les Pyrénées centrales**

J. Hydrol. , 356 ( 2008 ) , p. 245 - 260

[ArticleTélécharger le PDF](#)[Google Scholar](#)

[García-Ruiz et Lana-Renault, 2011](#)

JM García-Ruiz , N. Lana-Renault

**Conséquences hydrologiques et érosives de l'abandon des terres agricoles en Europe, avec une référence particulière à la région méditerranéenne - une revue**

Agric. Écosystème. Environ. , 140 ( 2011 ) , p. 317 - 338

[Article](#) [Télécharger le PDF](#) [Afficher l'enregistrement dans Scopus](#) [Google Scholar](#)

[García-Ruiz et al., 2011](#)

JM García-Ruiz , JI López-Moreno , SM Vicente-Serrano , T. Lasanta-Martínez , S. Beguería

**Les ressources en eau méditerranéennes dans un scénario de changement global**

Terre Sci. Rév. , 105 ( 2011 ) , p. 121 - 139

[Article](#) [Télécharger le PDF](#) [Afficher l'enregistrement dans Scopus](#) [Google Scholar](#)

[Giuntoli et al., 2013](#)

I. Giuntoli , B. Renard , J.-P. Vidal , A. Bard

**Les étiages en France et leur relation avec les indices climatiques à grande échelle**

J. Hydrol. , 482 ( 2013 ) , p. 105 - 118

[Article](#) [Télécharger le PDF](#) [Afficher l'enregistrement dans Scopus](#) [Google Scholar](#)

[Gonzalez-Hidalgo et al., 2011](#)

JC González-Hidalgo , M. Brunetti , M. de Luis

**Un nouvel outil pour l'analyse des précipitations mensuelles en Espagne : la base de données MOPREDAS (tendances mensuelles des précipitations de décembre 1945 à novembre 2005)**

Int. J. Climatol. , 31 ( 2011 ) , p. 715 - 731

[Recherche de PDF...](#)

[RéfCroisée](#) [Afficher l'enregistrement dans Scopus](#) [Google Scholar](#)

[Gonzalez-Hidalgo et al., 2015](#)

JC Gonzalez-Hidalgo , D. Peña-Angulo , M. Brunetti , N. Cortesi

**MOTEDAS : une nouvelle base de données mensuelle sur la température de l'Espagne continentale et l'évolution de la température (1951-2010)**

Int. J. Climatol. , 35 ( 2015 ) , p. 4444 - 4463

[Recherche de PDF...](#)

[RéfCroisée](#) [Afficher l'enregistrement dans Scopus](#) [Google Scholar](#)

[Hargreaves et Samani, 1985](#)

GL Hargreaves , ZA Samani

**Évapotranspiration de la culture de référence à partir de la température**

Appl. Ing. Agric. , 1 ( 1985 ) , p. 96 - 99

[Google Scholar](#)

[Hartmann et al., 2013](#)

DL Hartmann , AMG Klein

Tank , M. Rusticucci , LV Alexander , S. Brönnimann , Y. Charabi , FJ Dentener , EJ Dlugokencky , DR East erling , A. Kaplan , BJ Soden , PW Thorne , M. Wild , PM Zhai

**Observations : atmosphère et surface**

TF Stocker , D. Qin , G.-

K. Plattner , M. Tignor , SK Allen , J. Boschung , A. Nauels , Y. Xia , V. Bex , PM Midgley (Eds.) , Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution du groupe de travail I au cinquième rapport d'évaluation

du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat , Cambridge University Press , Cambridge, Royaume-Uni/New York, NY, États-Unis ( 2013 ), p. 159 - 254 , [10.1017/CBO9781107415324.008](https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.008)

[Recherche de PDF...](#)

[Google Scholar](#)

[Ibañez et al., 1996](#)

C. Ibañez , N. Prat , A. Canicio

**Modifications de l'hydrologie et du transport sédimentaire produites par les grands barrages sur le cours inférieur de l'Èbre et son estuaire**

Régul. Rivières Rés. Faire en sorte. , 12 ( 1996 ) , p. 51 - 62

[Afficher l'enregistrement dans Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Kunkel et al., 1999](#)

KE Kunkel , RA Pielke Jr. , SA Changnon

**Fluctuations temporelles des extrêmes météorologiques et climatiques qui ont des répercussions sur l'économie et la santé humaine : un examen**

Taureau. Un m. Météorol. Soc. , 80 ( 1999 ) , p. 1077 - 1098

[Google Scholar](#)

[Lana-Renault et al., 2007](#)

N. Lana-Renault , J. Latron , D. Regüés

**Réponse de l'écoulement fluvial et dynamique de la nappe phréatique dans un bassin de recherche subméditerranéen (Pyrénées Centrales)**

J. Hydrol. , 347 ( 2007 ) , p. 497 - 507

[Article](#)[Télécharger le PDF](#)[Afficher l'enregistrement dans Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Lana-Renault et al., 2012](#)

N. Lana-Renault , E. Nadal-Romero , MP Serrano-Muela , B. Alvera , P. Sánchez-Navarrete , Y. Sanjuan , JM García-Ruiz

**Analyse comparative de la réponse de différentes couvertures terrestres à un événement pluvieux exceptionnel dans les Pyrénées centrales espagnoles, octobre 2012**

Terre Surf. Traiter. Landf. , 39 ( 5 ) ( 2012 ) , p. 581 - 592

[Google Scholar](#)

[Lasanta et al., 2005](#)

T. Lasanta , SM Vicente Serrano , JM Cuadrat

**Variabilité spatio-temporelle du paysage végétal des hauts plateaux méditerranéens due à l'abandon des usages traditionnels du sol : une étude des Pyrénées centrales espagnoles**

Appl. Géogr. , 25 ( 2005 ) , p. 47 - 65

[Google Scholar](#)

[Ligon et al., 1995](#)

FK Ligon , WE Dietrich , WJ Trush

**Effets écologiques en aval des barrages – une perspective géomorphologique**

BioScience , 45 ( 1995 ) , p. 183 - 192

[Recherche de PDF...](#)

[RéfCroisée](#)[Afficher l'enregistrement dans Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Llasat et Puigcerver, 1997](#)

MC Llasat , M. Puigcerver

**Précipitations et précipitations convectives en Catalogne, Espagne**

Int. J. Climatol. , 17 ( 1997 ) , p. 1683 - 1695

[Afficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Llasat et al., 2009](#)

MC Llasat , M. Llasat-Botija , M. Barnolas , L. Opez , V. Altava-Ortiz

**Une analyse de l'évolution des extrêmes hydrométéorologiques dans les journaux : le cas de la Catalogne, 1982-2006**

Nat. Dangers Terre Syst. Sci. , 9 ( 2009 ) , p. 1201 - 1212

[Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Llasat et al., 2010](#)

MC Llasat , M. Llasat-Botija , A. Rodriguez , S. Lindbergh

**Crues éclair en Catalogne : une situation récurrente**

Adv. Géosci. , 26 ( 2010 ) , p. 105 - 111

[Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Llasat et al., 2013](#)

MC Llasat , M. Llasat-Botija , O. Petrucci , AA Pasqua , J. Rosselló , F. Vinet , L. Boissier

**Vers une base de données sur l'impact sociétal des inondations en Méditerranée dans le cadre du projet HYMEX**

Nat. Dangers Terre Syst. Sci. , 13 ( 2013 ) , p. 1337 - 1350

[Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Llasat et al., 2014](#)

MC Llasat , R. Marcos , M. Llasat-Botija , J. Gilabert , M. Turco , P. Quintana-Seguí

**Évolution des crues éclair en Méditerranée nord-occidentale**

Atmos. Rés. , 149 ( 2014 ) , p. 230 - 243

[ArticleTélécharger le PDFAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Lopez-Bustins et al., 2013](#)

JA Lopez-Bustins , D. Pascual , E. Pla , J. Retana

**Variabilité future des sécheresses dans trois bassins versants méditerranéens**

Nat. Dangers , 69 ( 2013 ) , pp. 1405 - 1421

[Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Lopez-Moreno et al., 2002](#)

JI López-Moreno , S. Beguería , JM García-Ruiz

**Influence du réservoir de Yesa sur les crues du fleuve Aragon, Pyrénées espagnoles centrales**

Hydrol. Terre Syst. Sci. , 6 ( 2002 ) , p. 753 - 762

[Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Lopez-Moreno et al., 2006](#)

JI López-Moreno , S. Beguería , JM García-Ruiz

**Tendances des hauts débits dans les Pyrénées centrales espagnoles : réponse aux facteurs climatiques ou au changement d'affectation des sols ?**

Hydrol. Sci. J. , 51 ( 2006 ) , p. 1039 - 1050

[\\_Recherche de PDF...](#)

This article is free to access.

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Lopez-Moreno et al., 2009](#)

JI López-Moreno , SM Vicente-Serrano , S. Beguería , JM García-Ruiz , MM Portela , AB Almeida

**Propagation en aval des sécheresses hydrologiques dans les fleuves transfrontaliers très régulés : le cas du Tage entre l'Espagne et le Portugal**

Ressource en eau. Rés. , 45 ( 2009 ) , p. W02405 , [10.1029/2008WR007198](#)

[\\_Recherche de PDF...](#)

This article is free to access.

[Afficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Lopez-Moreno et al., 2010](#)

JI López-Moreno , SM Vicente-Serrano , M. Angulo-Martínez , S. Beguería , A. Kenawy

**Tendances des précipitations quotidiennes dans le nord-est de la péninsule ibérique, 1955-2006**

Int. J. Climatol. , 30 ( 2010 ) , p. 1026 - 1041

[\\_Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Lopez-Moreno et al., 2013](#)

JI López-Moreno , SM Vicente-Serrano , J. Zabalza , S. Beguería , J. Lorenzo-Lacruz , C. Azorin-Molina , E. Morán-Tejeda

**Réponse hydrologique à la variabilité climatique à différentes échelles de temps : une étude dans le bassin de l'Èbre**

J. Hydrol. , 477 ( 2013 ) , p. 175 - 188

[ArticleTélécharger le PDFAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Lorenzo-Lacruz et al., 2010](#)

J. Lorenzo-Lacruz , SM Vicente-Serrano , JI López-Moreno , S. Beguería , JM García-Ruiz , JM Cuadrat

**L'impact des sécheresses et de la gestion de l'eau sur divers systèmes hydrologiques dans le cours supérieur du Tage (centre de l'Espagne)**

J. Hydrol. , 386 ( 2010 ) , p. 13 - 26

[ArticleTélécharger le PDFAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Lorenzo-Lacruz et al., 2013](#)

J. Lorenzo-Lacruz , SM Vicente-Serrano , JC González-Hidalgo , JI López-Moreno , N. Cortesi

**Réponse de la sécheresse hydrologique à la sécheresse météorologique dans la péninsule ibérique**

Climat Rés. , 58 ( 2013 ) , p. 117 - 131

[\\_Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Lorenzo-Lacruz et Moran-Tejeda, 2016](#)

J. Lorenzo-Lacruz , E. Morán-Tejeda

### **Schémas spatio-temporels des sécheresses météorologiques dans les îles Baléares (Espagne)**

Cuad. Enquête Géogr. , 42 ( 2016 ) , p. 49 - 66

[Recherche de PDF...](#)

This article is free to access.

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Lorenzo-Lacruz et al., 1945–2005](#)

J. Lorenzo-Lacruz , SM Vicente-Serrano , JI López-Moreno , E. Morán-Tejeda , J. Zabalza

### **Tendances récentes des débits ibériques**

J. Hydrol. , 414-415 ( 1945–2005 ) , p. 463 - 475

[Google Scholar](#)

[Machado et al., 2015](#)

MJ Machado , BA Botero , J. López , F. Francés , A. Díez-Herrero , G. Benito

### **Analyse de la fréquence des crues des données historiques sur les crues sous modélisation stationnaire et non stationnaire**

Hydrol. Terre Syst. Sci. , 19 ( 2015 ) , p. 2561 - 2576

[Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Magilligan et Nislow, 2005](#)

FJ Magilligan , KH Nislow

### **Modifications du régime hydrologique par les barrages**

Géomorphologie , 71 ( 2005 ) , pp. 61 - 78

[ArticleTélécharger le PDFAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[McKee et al., 1993](#)

TB McKee , NJ Doesken , J. Kleist

### **La relation entre la fréquence et la durée des sécheresses et les échelles de temps**

Prépublications, Huitième Conf. sur la climatologie appliquée, Anaheim, Californie , Amer. Météore. Soc. ( 1993 ) , p. 179 - 184

[Google Scholar](#)

[McMahon et al., 2006](#)

TA McMahon , AJ Adeloye , S.-L. Zhou

### **Comprendre les mesures de performance des réservoirs**

J. Hydrol. , 324 ( 2006 ) , p. 359 - 382

[ArticleTélécharger le PDFAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Mediero et al., 2014](#)

L. Mediero , D. Santillán , L. Garrote , A. Granados

### **Détection et attribution des tendances de l'ampleur, de la fréquence et du moment des inondations en Espagne**

J. Hydrol. , 517 ( 2014 ) , p. 1072 - 1088

[Article](#)[Télécharger le PDF](#)[Afficher l'enregistrement dans Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Mediero et al., 2015](#)

L. Mediero , TR Kjeldsen , N. Macdonald , S. Kohnova , B. Merz , S. Vorogushyn , D. Wilson , T. Albuquerque , G. Blöschl , E. Bogdanowicz , A. Castellarin , J. Hall , M. Kobold , J. Kriauciuniene , M. Lang , H. Madsen , G. OnuşluelGül , RAP Perdigão , LA Roald , JL Salinas , AD Toumazis , N. Veijalainen , Ó. Órarinsson

**Identification de régions inondables cohérentes à travers l'Europe en utilisant les enregistrements de débits les plus longs**

J. Hydrol. , 528 ( 2015 ) , p. 341 - 360

[Article](#)[Télécharger le PDF](#)[Afficher l'enregistrement dans Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Mestre et al., 2013](#)

O. Mestre , P. Domonkos , F. Picard , I. Auer , S. Robin , E. Lebarbier , R. Böhm , E. Aguilar , J. Guijarro , G. Vertachnik , M. Klancar , B. Dubuisson , P. Stepanek

**HOMER : un logiciel d'homogénéisation–méthodes et applications**

IDOJÁRÁS QJ Hung. Météorol. Servir. , 117 ( 2013 ) , p. 47 - 67

[Afficher l'enregistrement dans Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Moran-Tejeda et al., 2012](#)

E. Morán-Tejeda , JI López-Moreno , SM Vicente-Serrano , J. Lorenzo-Lacruz , A. Ceballos-Barbancho

**L'évolution contrastée des hauts et des bas débits et des indices de précipitations dans le bassin du Duero (Espagne)**

Hydrol. Sci. J. , 57 ( 2012 ) , p. 591 - 611

[Recherche de PDF...](#)

This article is free to access.

[RéfCroisée](#)[Afficher l'enregistrement dans Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Nislow et al., 2002](#)

KH Nislow , FJ Magilligan , H. Fassnacht , D. Bechtel , A. Ruesink

**Effets de la mise en eau du barrage sur le régime d'inondation des communautés naturelles des plaines inondables de la rivière Upper Connecticut**

Confiture. Ressource en eau. Assoc. , 38 ( 2002 ) , p. 1533 - 1548

[Recherche de PDF...](#)

[RéfCroisée](#)[Afficher l'enregistrement dans Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Osborn et al., 2000](#)

TJ Osborn , M. Hulme , PD Jones , TA Basnett

**Tendances observées de l'intensité quotidienne des précipitations au Royaume-Uni**

Int. J. Climatol. , 20 ( 2000 ) , p. 347 - 364

[Afficher l'enregistrement dans Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Pasteur et al., 2001](#)

F. Pastor , MJ Estrela , D. Peñarrocha , MM Millán

**Pluies torrentielles sur la côte méditerranéenne espagnole : modélisation des effets de la température de surface de la mer**

J. Appl. Météorol. , 40 ( 2001 ) , p. 1180 - 1195

[Afficher l'enregistrement dans Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Piqué et al., 2016](#)

G. Piqué , RJ Batalla , S. Sabater

**Caractérisation hydrologique des rivières endiguées dans la région nord-ouest de la Méditerranée**

Hydrol. Traiter. , 30 ( 2016 ) , p. 1691 - 1707

[\\_Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Ramis et al., 1997](#)

C. Ramis , J. Arús , JM López , AM Mestres

**Deux cas de phénomènes météorologiques violents en Catalogne (Espagne) : une étude observationnelle**

Météorol. Appl. , 4 ( 1997 ) , p. 207 - 217

[\\_Recherche de PDF...](#)

This article is free to access.

[Afficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Renard et al., 2008](#)

B. Renard , M. Lang , P. Bois , A. Dupeyrat , O. Mestre , H. Niel , E. Sauquet , C. Prudhomme , S. Parey , E. Paquet , L. Neppel , J. Gailhard

**Méthodes régionales de détection des tendances : évaluation de l'importance du champ et de la cohérence régionale**

Ressource en eau. Rés. , 44 ( 2008 )

UN W08419

[Google Scholar](#)

[Rodrigo, 2010](#)

FS Rodrigue

**Évolution de la probabilité de précipitations journalières extrêmes observées de 1951 à 2002 dans la péninsule ibérique**

Int. J. Climatol. , 30 ( 2010 ) , p. 1512 - 1525

[\\_Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Salazar et al., 2012](#)

S. Salazar , F. Frances , J. Komma , T. Blume , T. Francke , A. Bronstert , G. Bloschl

**Une analyse comparative de l'efficacité des mesures de gestion des crues basées sur le concept de "rétention d'eau dans le paysage" dans différentes régions hydro-climatiques européennes**

Nat. Dangers Terre Syst. Sci. , 12 ( 2012 ) , p. 3287 - 3306

[\\_Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Santer et al., 2007](#)

BD Santer , C. Mears , FJ Wentz , KE Taylor , PJ Gleckler , TML Wigley , TP Barnett , *et al.*

**Identification des changements induits par l'homme dans la teneur en humidité atmosphérique**

Proc. Natl. Acad. Sci. États- Unis , 104 ( 2007 ) , p. 15248 - 15253

[\\_Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Seneviratne et al., 2012](#)

SI Seneviratne , N. Nicholls , D. Easterling , CM Goodess , S. Kanae , J. Kossin , Y. Luo , J. Marengo , K. Mc Innes , M. Rahimi , M. Reichstein , A. Sorteberg , C. Vera , X.Zhang \_

### **Changements dans les extrêmes climatiques et leurs impacts sur l'environnement physique naturel**

CB Field , V. Barros , TF Stocker , D. Qin , DJ Dokken , KL Ebi , MD Mastrandrea , KJ Mach , G.-K. Plattner , SK Allen , M. Tignor , PM Midgley (Eds.) , Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation , Un rapport spécial des groupes de travail I et II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), Cambridge University Press , Cambridge, Royaume-Uni/New York, NY, États-Unis ( 2012 ) , p. 109 - 230

[Google Scholar](#)

[Serrano-Muela et al., 2015](#)

MP Serrano-Muela , E. Nadal-Romero , N. Lana-Renault , JC González-Hidalgo , JI López-Moreno , S. Beguería , Y. Sanjuan , JM García-Ruiz

### **Un événement pluvieux exceptionnel dans les Pyrénées centrales occidentales : modèles spatiaux de débit et d'impact**

Dégradation des terres. Dév. , 26 ( 2015 ) , p. 249 - 262

[Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Sharma et Panu, 2014](#)

TC Sharma , US Panu

### **Modélisation des durées et des ampleurs des sécheresses hydrologiques : expériences sur les débits fluviaux canadiens**

J. Hydrol. Rég. Étalon. , 1 ( 2014 ) , p. 92 - 106

[ArticleTélécharger le PDFAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Sheffield et al., 2012](#)

J. Sheffield , EF Wood , ML Roderick

### **Peu de changement dans la sécheresse mondiale au cours des 60 dernières années**

Nature , 491 ( 2012 ) , p. 435 - 438

[Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Silva et al., 2012](#)

AT Silva , MM Portela , M. Naghettini

### **Non-stationnarité dans les taux d'occurrence des inondations dans les bassins versants portugais**

Hydrol. Terre Syst. Sci. , 16 ( 2012 ) , p. 241 - 254

[Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Smith et al., 2010](#)

JA Smith , ML Baeck , G. Villarini , WF Krajewski

### **L'hydrologie et l'hydrométéorologie des inondations dans le bassin du fleuve Delaware**

J. Hydrométéorol. , 11 ( 2010 ) , p. 841 - 859

[Afficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Song et al., 2015](#)

W.-Z. Chanson , Y.-Z. Jiang , X.-H. Lei , H. Wang , D.-C. Shu

**Analyse annuelle des tendances du ruissellement et du régime des crues et relation avec les réservoirs dans le bassin de la rivière Sanchahe, Chine**

Quat. Int. , 380–381 ( 2015 ) , p. 197 - 206

[Article](#)[Télécharger le PDF](#)[Afficher l'enregistrement dans Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Spinoni et al., 2015](#)

J. Spinoni , G. Naumann , JV Vogt , P. Barbosa

**Les plus grands événements de sécheresse en Europe de 1950 à 2012**

J. Hydrol. Rég. Étalon. , 3 ( 2015 ) , p. 509 - 524

[Article](#)[Télécharger le PDF](#)[Afficher l'enregistrement dans Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Thoms et Sheldon, 2000](#)

MC Thoms , F. Sheldon

**Rivières de plaine: une introduction australienne**

Rivière Rés. Appl. , 16 ( 2000 ) , p. 375 - 383

[Afficher l'enregistrement dans Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Thorndycraft et al., 2006](#)

VR Thorndycraft , M. Barriendos , G. Benito , M. Rico , A. Casas

**Les crues catastrophiques de l'an 1617 en Catalogne (nord-est de l'Espagne) et leur contexte climatique**

Hydrol. Sci. J. , 51 ( 2006 ) , p. 899 - 912

[Recherche de PDF...](#)

This article is free to access.

[RéfCroisée](#)[Afficher l'enregistrement dans Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Trenberth et al., 2005](#)

KE Trenberth , J. Fasullo , L. Smith

**Tendances et variabilité de la vapeur d'eau atmosphérique intégrée à la colonne**

Clim. Dyn. , 24 ( 2005 ) , p. 741 - 758

[Recherche de PDF...](#)

[RéfCroisée](#)[Afficher l'enregistrement dans Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Trenberth, 2012](#)

KE Trenberth

**Définir la manière de relier les extrêmes climatiques au changement climatique**

Clim. Changement , 115 ( 2012 ) , p. 283 - 290

[Recherche de PDF...](#)

This article is free to access.

[RéfCroisée](#)[Afficher l'enregistrement dans Scopus](#)[Google Scholar](#)

[Trenberth et al., 2014](#)

K. Trenberth , *et al.*

**Réchauffement climatique et évolution de la sécheresse : attentes, constats et incertitudes**

Nat. Clim. Changement , 4 ( 2014 ) , p. 17 - 22

[Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Turco et Llasat, 2011](#)

M. Turco , MC Llasat

**Tendances des indices des précipitations extrêmes quotidiennes en Catalogne (nord-est de l'Espagne), 1951–2003**

Nat. Dangers Terre Syst. Sci. , 11 ( 2011 ) , p. 3213 - 3226

[\\_Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Valence et al., 2012](#)

JL Valencia , AM Tarquis , A. Saá-Requejo , JM Gascó

**Changement des indices de précipitations extrêmes dans le bassin de l'Èbre**

Nat. Dangers Terre Syst. Sci. , 12 ( 2012 ) , p. 2127 - 2137

[\\_Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Van Dijk et al., 2013](#)

AIJM Van Dijk , HE Beck , RS Crosbie , RAM De Jeu , YY Liu , GM Podger , B. Timbal , NR Viney

**La sécheresse du millénaire dans le sud-est de l'Australie (2001-2009): causes naturelles et humaines et implications pour les ressources en eau, les écosystèmes, l'économie et la société**

Ressource en eau. Rés. , 49 ( 2013 ) , p. 1040 - 1057

[\\_Recherche de PDF...](#)

This article is free to access.

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Vicente Serrano et López-Moreno, 2005](#)

SM Vicente Serrano , JI López-Moreno

**Réponse hydrologique à différentes échelles de temps de sécheresse climatologique : une évaluation de l'indice de précipitation standardisé dans un bassin méditerranéen montagneux**

Hydrol. Terre Syst. Sci. , 9 ( 2005 ) , p. 523 - 533

[\\_Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Vicente Serrano, 2006](#)

SM Vicente Serrano

**Analyse spatiale et temporelle des sécheresses dans la péninsule ibérique (1910-2000)**

Hydrol. Sci. J. , 51 ( 2006 ) , p. 83 - 97

[\\_Recherche de PDF...](#)

This article is free to access.

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Vicente-Serrano et al., 2010](#)

SM Vicente-Serrano , Santiago Beguería , JI López-Moreno

**Un indice de sécheresse multi-scalaire sensible au réchauffement climatique : le Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI**

J. Climat , 23 ( 2010 ) , pp. 1696 - 1718

[Afficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Vicente-Serrano et al., 2011](#)

SM Vicente-Serrano , S. Beguería , JI López-Moreno

**Commentaire sur "Caractéristiques et tendances des diverses formes de l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer (PDSI) entre 1900 et 2008" par A. Dai**

J. Geophys. Rés. Atmos. , 116 ( 2011 ) , p. D19112 , [10.1029/2011JD016410](#)

[Recherche de PDF...](#)

This article is free to access.

[Afficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Vicente-Serrano et al., 2012](#)

SM Vicente-Serrano , JI López-Moreno , S. Beguería , J. Lorenzo-Lacruz , C. Azorin-Molina , E. Morán-Tejeda

**Calcul précis d'un indice de sécheresse du débit**

J. Hydrol. Ing. , 17 ( 2012 ) , p. 318 - 332

[Afficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Vicente-Serrano et al., 2014](#)

SM Vicente-Serrano , J.-I. Lopez-Moreno , S. Beguería , J. Lorenzo-Lacruz , A. Sanchez-Lorenzo , JM García-Ruiz , C. Azorin-Molina , E. Morán-Tejeda , J. Revuelto , R. Trigo , F. Coelho , F. Espejo \_

**Preuve de la gravité croissante de la sécheresse causée par la hausse des températures dans le sud de l'Europe**

Environ. Rés. Lett. , 9 ( 2014 ) , article 044001

[Recherche de PDF...](#)

This article is free to access.

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Vicente-Serrano et al., 2016](#)

SM Vicente-Serrano , *et al.*

**Effet des réservoirs sur le débit et les régimes fluviaux dans un bassin fluvial fortement régulé du nord-est de l'Espagne**

Catena ( 2016 ) , [10.1016/j.catena.2016.03.042](#)

[Recherche de PDF...](#)

[Google Scholar](#)

[Vicente Serrano, 2016](#)

SM Vicente Serrano

**Avant-propos : complexité de la sécheresse et évaluation dans des conditions de changement climatique**

Cuad. Enquête Géogr. , 42 ( 2016 ) , p. 7 - 11

[Recherche de PDF...](#)

[RéfCroiséeAfficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Vincent et al., 2002](#)

LA Vincent , B. Zhang , R. Bonsal , WD Hogg

**Homogénéisation des températures quotidiennes au Canada**

J. Climat , 15 ( 2002 ) , pp. 1322 - 1334

[Afficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Westra et al., 2014](#)

S. Westra , HJ Fowler , JP Evans , LV Alexander , P. Berg , F. Johnson , EJ Kendon , G. Lenderink , NM Roberts

**Changements futurs de l'intensité et de la fréquence des événements extrêmes de courte durée**

Rév. Geophys. , 52 ( 2014 )

[Google Scholar](#)

[Westra et al., 2013](#)

S. Westra , LV Alexander , FW Zwiers

**Tendances mondiales à la hausse des précipitations quotidiennes maximales annuelles**

J. Climat , 26 ( 11 ) ( 2013 ) , p. 3904 - 3918

[Afficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)

[Yeh et Becker, 1982](#)

WW-G. Ouy , L. Becker

**Analyse multiobjectif des opérations multiréservoirs**

Ressource en eau. Rés. , 18 ( 1982 ) , p. 1326 - 1336

[Afficher l'enregistrement dans ScopusGoogle Scholar](#)