





# Réviser les courbes intensité-durée-fréquence dans un contexte de nouvelle donne hydro-climatique : de la détection de tendances à l'application opérationnelle

Guillaume Chagnaud , Geremy Panthou , Théo Vischel  and Thierry Lebel 

CNRS, IRD, Grenoble INP, IGE, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France

## RÉSUMÉ

Dans le contexte actuel de transition vers un monde plus chaud, le climat d'aujourd'hui n'est déjà plus celui d'hier. Parmi les multiples conséquences de ce réchauffement global, l'intensification des précipitations pourrait entraîner une augmentation du risque d'inondation, poussant sphères opérationnelles et académiques à travailler conjointement pour adapter les pratiques à des conditions hydro-climatique évolutives. Au centre de cette adaptation se trouve la question de la modélisation statistique des précipitations et du calcul des courbes intensité-durée-fréquence qui en résultent, avec deux enjeux partagés. D'une part, des recherches innovantes sont à mener pour adapter les outils utilisés dans un contexte stationnaire. D'autre part, les utilisateurs de courbes IDF sont en attente d'une démarche leur permettant de poursuivre leur mission dans ce contexte de transition climatique. Nous proposons ici une démarche qui répond à ces enjeux avec deux objectifs : i) établir un diagnostic robuste de l'intensification des pluies extrêmes sur un spectre d'échelles spatiales et temporelles, et ii) permettre aux acteurs en charge du dimensionnement d'infrastructures et de la prévention du risque d'inondation de mettre à jour leurs pratiques. Le Sahel constitue un cas d'étude particulièrement pertinent mais la démarche exposée et les points de discussion qui en découlent se veulent génériques.

## Revising intensity-duration-frequency curves in the context of new hydro-climatic conditions: from trend detection to operational application

### ABSTRACT

In the current context of transition to a warmer world, today's climate is already different from yesterday's. Among the many consequences of global warming, rainfall intensification may lead to a greater risk of flooding, prompting the operational and academic spheres to work together to adapt practices to changing hydro-climatic conditions. At the heart of this adaptation lies the issue of statistical modelling of rainfall and the calculation of the resulting intensity-duration-frequency curves, with two shared challenges. On the one hand, innovative research needs to be carried out to adapt the tools used in a stationary context. Secondly, users of IDF curves are looking for an approach that will enable them to continue their work in this context of climate transition. We propose here an approach that responds to these challenges with two objectives: i) to establish a robust diagnosis of the intensification of extreme rainfall over a range of spatial and temporal scales, and ii) to enable the actors responsible for infrastructure design and flood risk prevention to update their practices. The Sahel is a particularly relevant case study, but the approach outlined and the ensuing discussion points are intended to be generic.

## MOTS-CLÉS

Courbes intensité-durée-fréquence ; non-stationnarité hydro-climatique ; risque d'inondation ; Sahel

## KEYWORDS

Intensity-duration-frequency curves; hydro-climatic non-stationarity; flood risk; Sahel

## 1. Introduction

Parmi les multiples conséquences du réchauffement global, celles concernant le cycle hydrologique revêtent une importance particulière pour les sociétés, dont le fonctionnement et la stabilité reposent largement sur leur maîtrise de l'eau en tant que ressource

mais aussi en tant que facteur de risque. Ces conséquences ont d'ores et déjà des implications concrètes pour un grand nombre d'acteurs de l'aménagement des territoires qui, comme récemment rappelé par le rapport du Haut Conseil pour le Climat (HCC, 2023),<sup>1</sup> sont mis au défi de l'adaptation de leurs pratiques. Ces

**CONTACT** Guillaume Chagnaud  [guillaume.chagnaud@univ-grenoble-alpes.fr](mailto:guillaume.chagnaud@univ-grenoble-alpes.fr)

\*Désormais affilié au UK Center for Ecology and Hydrology.

<sup>1</sup><https://www.vie-publique.fr/rapport/290091-rapport-annuel-2023-du-haut-conseil-pour-le-climat>.

© 2023 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. The terms on which this article has been published allow the posting of the Accepted Manuscript in a repository by the author(s) or with their consent.

dernières reposent en effet très largement sur l'hypothèse d'un climat stationnaire, qui consiste à considérer que les valeurs statistiques permettant de le décrire – et sur lesquelles, parmi d'autres éléments, s'appuie la prise de décision – ne varient pas dans le temps. La validité de cette hypothèse s'étiole à mesure que le réchauffement se poursuit et que le cycle hydrologique s'intensifie (voir par exemple à ce sujet, Gudmundsson et al., 2021 ; Ham et al., 2023 ; Myhre et al., 2019).

L'un des défis auxquels est confrontée aujourd'hui la communauté hydrologique, de la sphère académique à la sphère opérationnelle, est donc de développer et d'adopter des méthodes pour tenir compte de la non-stationnarité du système climatique (Milly et al., 2008 ; Salas et al., 2018 ; Wasko et al., 2021). Le risque, si ce challenge n'est pas (correctement) relevé, est un dépassement "de la capacité de prévention et de gestion de crises" (HCC, 2023). En contrepartie, l'intégration de la non-stationnarité dans les pratiques implique la prise en compte d'un nombre de sources d'incertitude additionnelles pouvant affecter notre capacité à prendre les bonnes décisions (cf Section 4 pour une discussion de ces dernières).

La non-stationnarité du climat dérivant des activités humaines a conduit la communauté scientifique à se structurer autour de trois défis connectés que sont la détection, l'attribution et la projection. Tandis que le premier consiste à identifier des évolutions en cours à partir de données d'observations, le second tente de répondre à la question : les activités humaines sont-elles, et dans quelles proportions, à l'origine de ces évolutions ? Cela nécessite le recours à des simulations climatiques réalisées en conditions idéalisées, permettant d'isoler les rôles respectifs des différents agents de forçages – naturels ou anthropiques – du climat. Le troisième vise à quantifier les évolutions futures.

Ce triptyque détection-attribution-projection apparaît comme un préalable important pour informer la prise de décision, qu'elle relève de la définition de politiques publiques pour l'adaptation ou de pratiques d'ingénierie pour l'aménagement du territoire. Dans le domaine de l'hydro-climatologie, les pratiques de gestion des risques liés à l'eau – sécheresses ou inondations – sont fortement re-questionnées face aux impacts attendus du changement climatique. Les demandes pour intégrer les évolutions du climat dans les études hydrologiques se multiplient. Cependant, en l'absence de méthodes standard ou d'outils adéquats, l'ingénierie hydrologique reste encore mal équipée pour répondre de façon pertinente à ces demandes. On s'intéresse ici à un outil largement utilisé dans les méthodes de pluie-débit de détermination des crues, associé à une représentation statistique du régime pluviométrique d'une zone climatique : les courbes intensité-durée-fréquence (IDF). Détecter comment elles sont modifiées par le réchauffement

climatique, identifier les facteurs du régime pluviométrique qui contrôlent ces modifications et dessiner des trajectoires de leurs possibles évolutions futures ont formé les trois axes qui ont guidé un travail de thèse réalisé à l'Institut de Géosciences de l'Environnement de Grenoble (Chagnaud, 2022). On s'attache ici à présenter le cadre de modélisation des courbes IDF issu de ce travail (Section 2). On montrera comment la non-stationnarité peut être prise en compte dans un modèle statistique original de courbes IDF. On illustrera sur un cas d'étude au Niger comment ce modèle peut à la fois servir à détecter des changements du régime pluviométrique et traduire ces changements en des termes adaptés aux besoins des hydrologues praticiens (Section 3). Quelques-unes des difficultés récurrentes dans la mise à disposition d'informations climatiques sont examinées à la Section 4 avant de conclure (Section 5).

## 2. Méthode

### 2.1. Courbes intensité-durée-fréquence (IDF) : généralités

Les courbes IDF sont un outil d'aide à la décision largement utilisé en ingénierie, notamment dans le domaine de l'hydrologie. Entre autres applications, elles permettent de concevoir des infrastructures hydrauliques (systèmes d'évacuation des eaux usées ou de drainage des eaux de ruissellement, réservoirs, digues, barrages) et d'évaluer les risques d'inondation. Elles indiquent pour cela l'intensité de précipitation ( $i$ , en  $\text{mm h}^{-1}$ ) d'un événement de probabilité de non-dépassement  $p$  (ou de période de retour  $T = 1/(1 - p)$ ) donnée, pour une gamme de durées d'agrégation des précipitations  $D$  (par exemple : de l'horaire au journalier i.e.  $D \in [1\text{h}, 24\text{h}]$ ). L'intérêt de connaître l'intensité de pluie pour plusieurs durées d'agrégation est de pouvoir choisir celle qui correspond au temps de concentration du bassin versant.

Les courbes IDF découlent donc de la modélisation statistique permettant l'estimation de la fréquence d'un événement intense ou, inversement, l'intensité d'un événement rare, dit "extrême".<sup>2</sup> Cette modélisation consiste en l'ajustement d'une distribution statistique sur un échantillon souvent restreint de valeurs, ce qui implique l'estimation des paramètres de cette distribution. Dès lors, précision et robustesse du modèle résultent d'un compromis entre le nombre de paramètres à estimer et la quantité de données disponibles (taille de l'échantillon).

Le cadre théorique dans lequel s'inscrit la modélisation de la distribution des valeurs extrêmes permet une reformulation de la question de la détection. Il s'agira d'identifier s'il existe un modèle alternatif au

<sup>2</sup>Un événement est d'autant plus extrême que son intensité est élevée / que sa fréquence est faible. Voir, par exemple, Pendergrass (2018) pour un éclairage sur la notion d'extrême hydro-climatique.

modèle stationnaire qui s'ajuste mieux aux observations recueillies au cours de la période de transition climatique. Il faudra garder à l'esprit, ce faisant, que le modèle alternatif, plus flexible par essence que sa contre-partie stationnaire implique nécessairement i) un meilleur ajustement à la série de valeurs de pluie, mais par forcément significativement meilleur, et ii) une plus grande incertitude d'estimation (à taille d'échantillon constante). Des métriques statistiques mesurant l'amélioration en termes de qualité d'ajustement (significativité et incertitude), compte tenu du nombre de degrés de liberté des modèles évalués, seront par conséquent nécessaires.

## 2.2. Courbes IDF dans un climat stationnaire

La théorie des valeurs extrêmes (extreme value theory, EVT) fournit un cadre formel adapté à "la description de l'inhabituel plutôt que de l'habituel" (Coles, 2001). Elle est par conséquent largement exploitée par les directives nationales d'estimation de pluies extrêmes (Svensson & Jones, 2010). Lorsque les intensités de pluie sont échantillonnées via une approche dite de "block maxima", consistant à extraire la valeur maximale d'un bloc – par exemple une année (éventuellement hydrologique) – et garantissant leur indépendance, l'EVT indique que la variable aléatoire  $I$  représentant ces valeurs peut être modélisée par l'une des distributions de la famille des GEV (generalised extreme value). Dans sa forme la plus générale, celle-ci est décrite avec les trois paramètres  $\mu$ ,  $\sigma$  et  $\xi$ , représentant respectivement la position, l'échelle et la forme de la distribution, de fonction de répartition  $F$  :

$$I \sim F\{\mu, \sigma, \xi\} \quad (1)$$

L'intensité de l'événement de pluie de période de retour  $T$ , appelé niveau de retour et noté  $i(T)$ , dérive de l'Équation (1) :

$$i(T) = F^{-1}(1 - 1/T) \quad (2)$$

L'approche classique pour obtenir des courbes IDF consiste à ajuster une distribution GEV pour chaque durée d'agrégation des précipitations et à en extraire des valeurs de niveaux de retour. Cette méthode "semi-empirique" présente l'avantage d'être flexible et permet de générer des IDF valables sur une large gamme de durées. Il est néanmoins nécessaire d'estimer  $3 \times N$  paramètres ( $N$  étant le nombre de durées), ce qui peut rendre l'inférence globale peu robuste, notamment dans le cas de jeux de données peu fournis (par exemple pour des pluies infra-journalières).

Une variété d'approches théoriques, initiées par les travaux pionniers de Koutsoyiannis et al. (1998), ont été développées pour faire face à ce problème d'inférence des courbes IDF. Le modèle décrit ici repose sur une hypothèse d'invariance entre durées d'agrégation, selon laquelle les propriétés statistiques (les paramètres du modèle) sont préservées sur une gamme de

durées donnée, à un facteur multiplicatif près. Issu de la théorie fractale, le modèle mathématique qui permet de décrire cette propriété est dit de simple scaling (Gupta & Waymire, 1990 ; Menabde et al., 1999) :

$$I(D) \stackrel{d}{=} I(D_0) \left(\frac{D}{D_0}\right)^\eta \quad (3)$$

où  $D_0$  est la durée de référence et  $\stackrel{d}{=}$  signifie qu'il y a égalité entre la distribution statistique des valeurs de référence et celle des valeurs mises à l'échelle par le facteur multiplicatif. Le paramètre  $\eta$  ( $\in [-1; 0]$ ) lorsqu'il s'agit d'intensités de pluie) gouverne la pente de la décroissance des intensités de pluie avec la durée d'agrégation : plus celui-ci est faible (proche de  $-1$ ), plus la décroissance est forte. En combinant les Équations (2) et (3), on obtient un modèle GEV-simple scaling stationnaire (GEV-SS-S) donnant le niveau de retour pour une période de retour  $T$  et une durée d'agrégation  $D$  données :

$$\begin{aligned} i(T, D) &= \left(\frac{D}{D_0}\right)^\eta \times F^{-1}(1 - 1/T) \\ &= \left(\frac{D}{D_0}\right)^\eta \left\{ \mu_{D_0} + \frac{\sigma_{D_0}}{\xi} \left\{ \left[-\log\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right]^{-\xi} - 1 \right\} \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

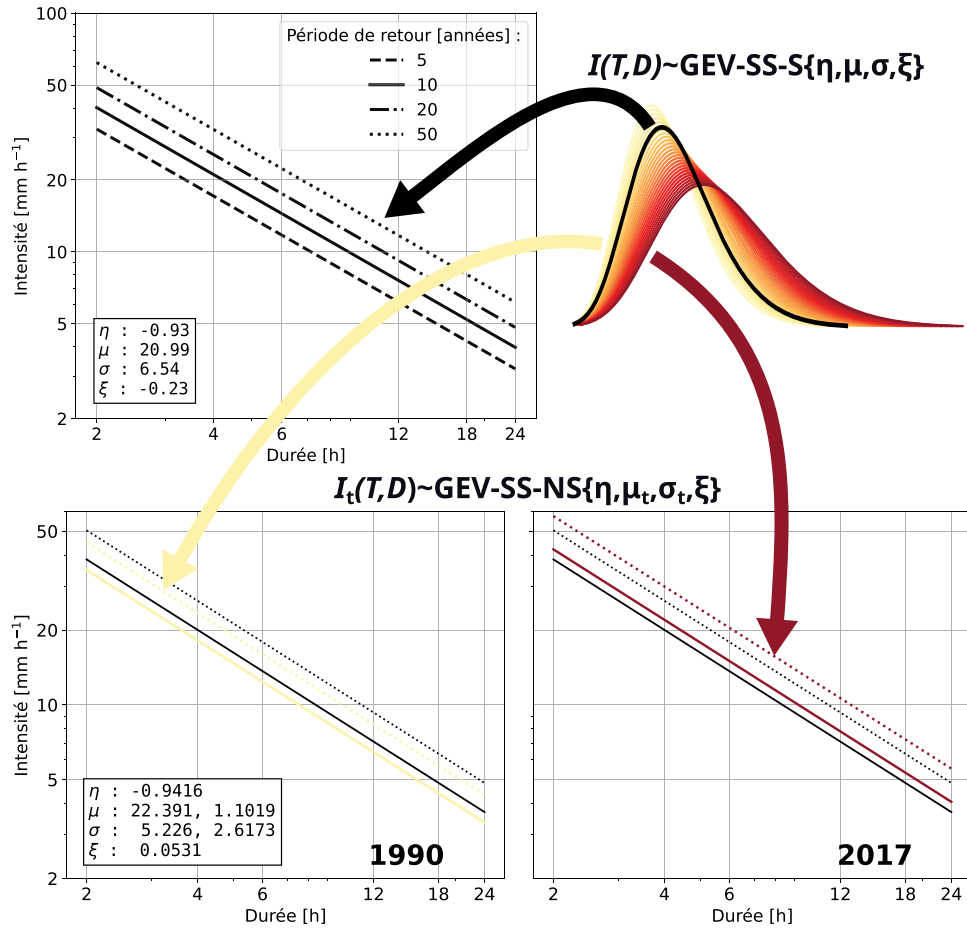
Les courbes IDF stationnaires dérivent directement de l'Équation (4), comme illustré dans le panneau en haut à gauche de la Figure 1 avec les données du cas d'application traité à la Section 3, pour  $T \in [5, 10, 20, 50]$  ans] et pour  $D$  allant de 2 h à 24 h. Un tel modèle a par exemple été développé sur le Sénégal (Sane et al., 2018) et dans la région des Cévennes (Blanchet et al., 2016).

## 2.3. Modèle IDF non-stationnaire

Il existe une diversité d'approches permettant de générer des courbes IDF non-stationnaires (Schlef et al., 2023). Dans le cas où le modèle GEV-SS-S (Équation (4)) est rendu non-stationnaire via une dépendance temporelle de ses paramètres, les niveaux de retour dérivant du modèle GEV-SS non-stationnaire (GEV-SS-NS) sont donnés par l'Équation (5) :

$$i_t(T, D) = \left(\frac{D}{D_0}\right)^{\eta_t} \left\{ \mu_t(D_0) + \frac{\sigma_t(D_0)}{\xi_t} \left\{ \left[-\log\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right]^{-\xi_t} - 1 \right\} \right\} \quad (5)$$

où  $t$  indique une variation temporelle des paramètres, soit directement selon une fonction temporelle prédéfinie, soit en incluant des co-variables qui évoluent dans le temps. En particulier, si l'objectif est de rendre compte des effets des forçages anthropiques sur le système climatique, une co-variable comme la température locale ou globale (voir un exemple pour la ville d'Hyderabad, en Inde, dans Agilan & Umamahesh, 2017) ou la concentration atmosphérique en  $\text{CO}_2$  (Tebaldi et al., 2023 ; Wehner et al., 2020) peuvent être appropriées.



**Figure 1.** Courbes IDF dérivées d'un modèle GEV-simple scaling stationnaire (GEV-SS-S, haut) et non-stationnaires (GEV-SS-NS, bas). Les niveaux de retour 10 ans (courbes en trait plein) et 50 ans (courbes en pointillés) non-stationnaires sont illustrés pour 1990 (bas, gauche) et 2017 (bas, droite). Les valeurs des paramètres des modèles GEV-SS-S et GEV-SS-NS sont indiquées sur les panneaux correspondant (les premiers et seconds nombres dans le panneau du bas correspondent à  $\mu_0$ ,  $\sigma_0$  et  $\mu_1$ ,  $\sigma_1$ , respectivement). Les fonctions de densité des modèles stationnaire (en noir) et non-stationnaire (en couleur) sont illustrées en haut à droite.

Dans ce qui suit nous représentons la non-stationnarité des paramètres en utilisant des fonctions temporelles pré-définies. Dans la pratique, toutes les formulations alternatives du modèle ne peuvent pas être testées et il convient d'identifier des formes d'évolutions temporelles *a priori*, sur la base de connaissances d'experts ou d'études empiriques (par exemple en évaluant l'évolution des paramètres statistiques par sous-périodes glissantes).

Dans les cas où l'analyse préliminaire des séries chronologiques de maxima annuels révèle une évolution systématique (à la baisse ou à la hausse), il est possible d'adopter une formulation dans laquelle un ou plusieurs des paramètres sont exprimés comme une fonction linéaire du temps. La Figure 1 fournit un exemple illustratif d'un modèle GEV-SS-NS qui incorpore des paramètres de position et d'échelle dépendant linéairement du temps, à savoir  $\mu_t = \mu_0 + \mu_1 \times t$  et  $\sigma_t = \sigma_0 + \sigma_1 \times t$ , où  $\mu_1$  et  $\sigma_1$  sont  $> 0$ . Ainsi,  $\mu_t$  et  $\sigma_t$  augmentent avec le temps : la distribution GEV est alors décalée vers des valeurs plus grandes et élargie (voir la vue schématique de la fonction de densité de probabilité dans la partie supérieure droite de la Figure 1). En

conséquence, les niveaux de retour augmentent également (d'après l'Équation (5)) et les courbes IDF sont décalées vers le haut (visible en comparant les panneaux inférieurs de la Figure 1, qui montrent les courbes IDF des pluies 10-ans et 50-ans à deux moments distincts). A noter que si le paramètre  $\eta$ , qui gouverne la pente des courbes IDF, peut également être rendu non-stationnaire dans le temps, il en va différemment pour le paramètre de forme de la GEV ( $\xi$ ), qui contrôle la queue de la distribution, soit les valeurs les plus rares : sa variance d'échantillonnage élevée rend l'inférence d'une éventuelle dépendance temporelle hors de portée avec les jeux d'observations typiques (voir Ouarda et al., 2019 et Haruna et al., 2022 pour des exceptions notoires).

Par rapport à d'autres études qui ajustent un modèle GEV non-stationnaire séparément pour chaque durée d'agrégation (par exemple, Cheng & AghaKouchak, 2015 ; Sarhadi & Soulis, 2017), l'intérêt de cette approche "unifiée" réside dans l'ajustement d'un unique modèle statistique pour toutes les durées. En plus de limiter considérablement le nombre de paramètres à estimer, cela garantit la cohérence entre les durées des

niveaux de retour évoluant dans le temps, là où une approche classique (une GEV par durée) peut conduire à des courbes IDF non-stationnaires qui se croisent, ce qui est physiquement impossible. Les deux questions qui demeurent à ce stade sont les suivantes :

- (1) L'amélioration de l'ajustement permise par l'utilisation d'un modèle plus complexe (plus flexible) est-elle statistiquement significative ?
- (2) Les valeurs de niveaux de retour dérivées de ce modèle sont-elles significativement différentes de leurs homologues stationnaires ?

Compte tenu du fait que la dépendance entre durées d'agrégation (le même événement pluvieux peut donner les maxima annuels de plusieurs durées, surtout lorsqu'elles sont proches, par exemple 2h et 4h) n'est pas explicitement prise en compte par le modèle, ces deux questions ne peuvent pas être traitées avec des mesures théoriques telles que les critères d'information de Bayes (BIC) ou d'Akaike (AIC) ou le test d'Anderson-Darling pour la significativité, ou la méthode Delta (Coles, 2001, Théorème 4) pour l'incertitude. Une technique de ré-échantillonnage aléatoire, dite de "bootstrap", permettant une estimation empirique de la significativité et des intervalles de confiance du modèle GEV-SS-NS, est alors utilisée (voir Chagnaud et al., 2021 ; Section 3 pour les détails méthodologiques).

### 3. Cas d'application

#### 3.1. Zone d'étude : le Sahel Ouest-Africain

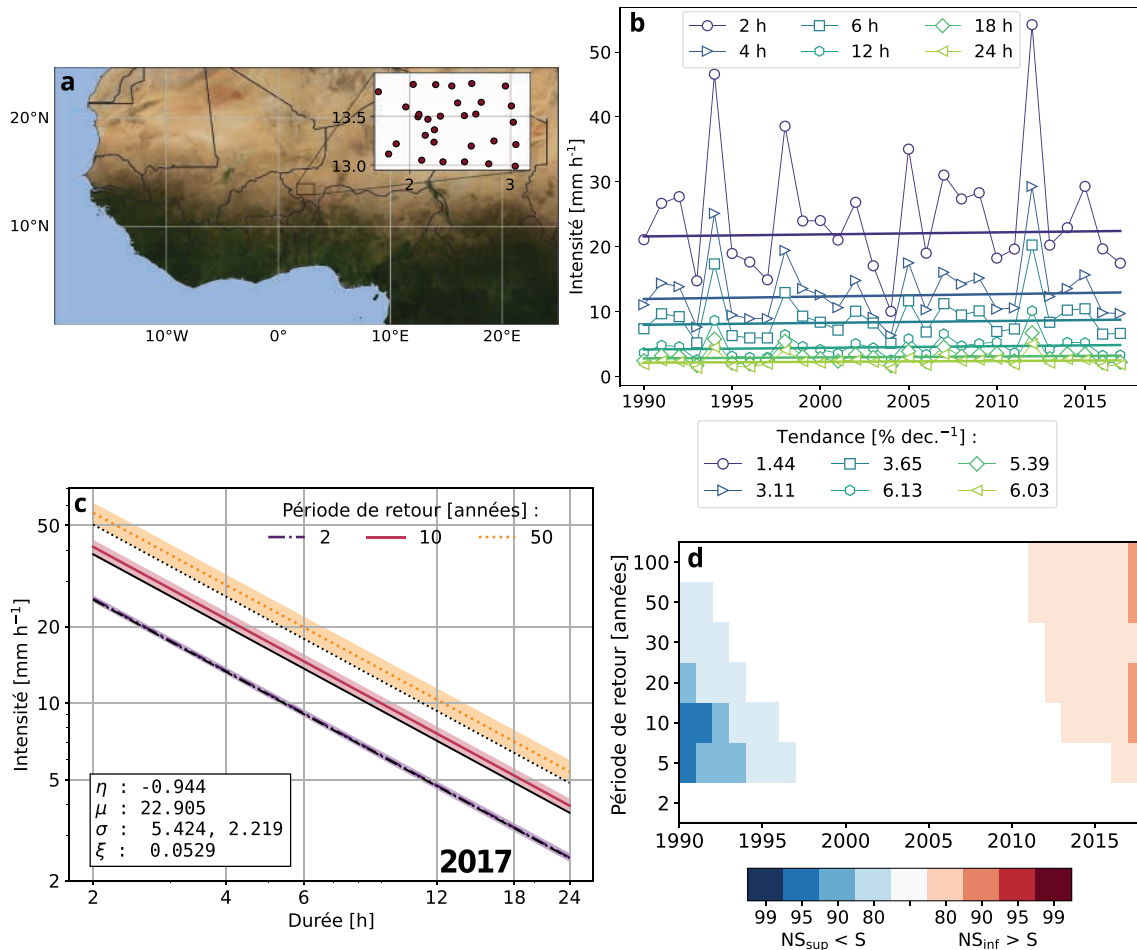
Le Sahel est une région du globe où fournir une information sur l'évolution du climat comme support à l'élaboration de stratégies d'adaptation est particulièrement important. C'est notamment le cas pour les variables du cycle de l'eau comme les précipitations, à l'origine du risque d'inondation. Ce dernier est particulièrement marqué au Sahel en raison, d'une part, de facteurs physiques (la nature des sols qui, combinée à des événements de pluie parmi les plus intenses au monde (Zipser et al., 2006), favorise le ruissellement) et, d'autre part, des facteurs humains : des infrastructures potentiellement déficientes (Amani & Paturel, 2017) et des méthodes souvent obsolètes car reposant sur l'hypothèse d'un climat stationnaire (Vischel et al., 2019) augmentent la vulnérabilité des populations. Une planification urbaine parfois insuffisante (Elagib et al., 2021 ; Miller et al., 2022) en accentue l'exposition. L'intensification en cours du régime des pluies sahélien et en particulier des extrêmes pluviométriques (Chagnaud et al., 2022 ; Panthou et al., 2018 ; Taylor et al., 2017), impliquant des facteurs anthropiques (Chagnaud et al., 2023), constitue une menace sérieuse pour la stabilité de ces sociétés (Scholes, 2020).

Dans un tel contexte, des demandes pour des outils d'aide à la décision hydrologiques sont clairement identifiés par les instances en charge de la gestion des risques hydro-climatiques tels que les services météorologiques ou hydrologiques régionaux ou nationaux ainsi que les bureaux d'étude en hydrologie (Amani & Paturel, 2017; CEDEAO, 2020 ; Miller et al., 2022). Un exemple de co-construction de services climatiques entre opérationnels et recherche a permis à l'ANACIM (agence nationale de l'aviation civile et de la météorologie au Sénégal) d'élaborer des courbes IDF et de les intégrer au sein de ses services climatiques (Sane et al., 2018). De plus, la possibilité d'avancer sur l'appropriation des méthodes issues de la recherche à des fins de services climatiques fait l'objet en Afrique de l'Ouest d'un projet d'ampleur financé par l'AFD et l'IRD (Cycle de l'Eau et Changement Climatique, CECC – <http://www.projet-cecc.org/>), dans lequel les courbes IDF sont identifiées comme un axe de collaboration majeur entre opérationnels et académiques.

#### 3.2. Résultats

Les données à haute résolution spatio-temporelle du réseau d'observation AMMA-CATCH Niger (Galle et al., 2018 ; Lebel et al., 2010), situé dans l'environnement semi-aride du Sahel Ouest-Africain (Figure 2(a)), sont utilisées à titre d'illustration de cette démarche. La Figure 2(b) montre les maxima annuels de précipitation enregistrés à la station de Niamey Aéroport (13.6°N, 2.1°E) entre 1990 et 2017, pour des durées d'agrégation allant de 2 h à 24 h. Des tendances à l'augmentation marquées (de 1.5 à 6.1 % décennie<sup>-1</sup> d'après une estimation de Sen), mais non statistiquement significatives (p-valeurs > 0.1 d'après un test de Mann-Kendall) y sont relevées. Plus globalement, seules quelques unes des 30 stations montrent des tendances significatives aux différentes durées d'agrégation explorées. À noter qu'une telle analyse est également possible pour des durées d'agrégation plus fines (jusqu'à 5 minutes) mais ne rentre pas dans le contour de cette étude en raison d'un changement de relation d'échelle (cf Equation (3)) pour des durées d'agrégation inférieures à 2 h.

Par la suite, les différentes stations ont été réunies en un échantillon régional, une hypothèse rendue possible par la stationnarité spatiale de la climatologie sur cette zone (Balme et al. 2006). Parmi les différentes formulations du modèle GEV-SS-NS testées sur la période 1990–2017, la plus significative s'avère être celle dont le paramètre d'échelle dépend linéairement du temps (i.e.  $\sigma_t = \sigma_0 + \sigma_1 \times t$ ) tandis que  $\mu$ ,  $\eta$  et  $\xi$  sont constants. La Figure 2(c) montre les courbes IDF obtenues à partir de ce modèle à la fin de la période d'étude (2017), pour les niveaux de retour 2, 10 et 50 ans ainsi que leurs intervalles de confiance à 90 % (écart 5e–95e percentiles, enveloppes de couleur). Les changements relatifs au cours de la période d'étude sont donnés à la Table 1.



**Figure 2.** (a) Carte du réseau de pluviomètres AMMA-CATCH Niger, au Sahel Ouest-Africain. (b) Tendances linéaires 1990–2017 des maxima annuels d’intensité de pluie pour des durées d’agrégation allant de 2 h à 24 h à la station de Niamey Aéroport. (c) Courbes IDF des niveaux de retour 2-, 10- et 50-ans pour l’année 2017 dérivées d’un modèle GEV-SS-NS où le paramètre d’échelle ( $\sigma$ ) de la GEV unifiée (régionale et multi-durée) dépend linéairement du temps (voir encart pour les valeurs de paramètres, avec  $\sigma_0$  et  $\sigma_1$  en première et seconde position, respectivement). Les courbes IDF stationnaires sont en noir. Les enveloppes de couleur représentent l’intervalle de confiance à 90 % des niveaux de retour non-stationnaires. (d) Significativité de la différence entre niveaux de retour non-stationnaires et niveaux de retour stationnaires correspondant. La couleur correspond à la largeur de l’intervalle de confiance (80, 90, 95, 99 %) à partir de laquelle les deux valeurs ne se chevauchent plus. Les années où la différence n’est pas significative à 80 % au moins sont en blanc. (b), (c) et (d) sont adaptés de Chagnaud et al. (2021).

Les IDF stationnaires sont affichées en noir à titre de comparaison. A noter que la méthode d’estimation de la significativité et de l’incertitude du modèle GEV-SS-NS tient compte de la dépendance entre stations, en conservant la structure spatiale lors du mélange aléatoire.

La Figure 2(d) permet de quantifier, pour chaque année et plusieurs périodes de retour  $\in [2, 100]$  ans, le degré avec lequel un niveau de retour non-stationnaire est différent de sa contre-partie stationnaire : la couleur bleue (resp. rouge) indique la largeur de l’intervalle de confiance (80–99 %) en-deçà de laquelle le dernier est supérieur (resp. inférieur) au premier (une couleur plus foncée indique une différence plus

importante). Il en ressort que les niveaux de retour les plus rares ( $T \in [50, 100]$ ) diffèrent plus fortement des valeurs stationnaires (bien qu’à un niveau de significativité limité : 80 à 90 %), par rapport aux événements plus fréquents ( $T \leq 30$ ). Ainsi, le signal plus important pour les événements les plus rares – tel qu’il est capturé par une tendance positive sur le paramètre d’échelle – surpasse l’incertitude plus grande qui affecte intrinsèquement ces quantiles.

#### 4. Discussion

Un modèle de distribution statistique des valeurs extrêmes non-stationnaire (GEV-SS-NS), décrit à la Section 2 et appliqué dans la section précédente à un cas d’étude dans le contexte semi-aride du Sahel Ouest-Africain, a permis de mettre en évidence une augmentation de l’intensité des événements de pluie extrêmes sur cette région, pour des durées d’agrégation allant de 2 h à 24 h. Cette intensification est

**Table 1.** Changements relatifs (en %) des niveaux de retour 2, 10, 50 et 100 ans sur la période 1990–2017 dérivés du modèle GEV-SS-NS régional. L’intervalle de confiance à 90 % (5e–95e percentiles) est donné entre crochets.

$\Delta i_2$	$\Delta i_{10}$	$\Delta i_{50}$	$\Delta i_{100}$
3.3 [1.2; 5.5]	14.8 [4.9; 25.7]	20.7 [6.8; 36.4]	22.6 [7.4; 39.7]

d'autant plus marquée que l'événement considéré est rare, un résultat de nature à inciter concepteurs et gestionnaires d'infrastructures dont la résistance est basée sur des valeurs parmi les plus fortes/rares à prendre des mesures rapides et pertinentes. Les courbes IDF non-stationnaires générées par ce modèle constituent un outil d'aide à la décision qui devrait devenir standard dans un contexte de transition climatique rapide qui a de fortes chances de se prolonger pour quelques décennies.<sup>3</sup>

Ces avancées laissent néanmoins la place à un certain nombre de points de discussion. Le premier est lié à l'échantillonnage spatial réalisé par les réseaux de mesure. Les données n'étant pas toujours disponibles à l'endroit d'intérêt pour l'utilisateur, il est parfois nécessaire d'exploiter l'information pluviométrique provenant de localisations voisines. Cela peut notamment (mais pas exclusivement) passer par un modèle mathématique représentant l'organisation spatiale des propriétés statistiques des pluies, avec les problèmes récurrents du compromis flexibilité-robustesse et de l'estimation du duo significativité-incertitude. Entre autres exemples, l'étude de Chagnaud et al. (2022) s'appuie sur un modèle GEV régional et non-stationnaire dans le temps, avec une dépendance spatiale – en latitude et longitude – des paramètres de position et d'échelle ( $\mu$  et  $\sigma$ , respectivement, d'après Panthou et al., 2012)) pour quantifier l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des extrêmes de pluie journalière sur le Sahel.

La seconde problématique concerne l'extrapolation, non plus dans l'espace mais dans le temps, de tendances détectées sur une période passée pour laquelle des observations sont disponibles. Cette étape est essentielle pour envisager des stratégies d'adaptation au changement climatique. Il s'agit ici de faire face à au moins trois difficultés :

- Le caractère difficilement prévisible des trajectoires socio-économiques futures, incluant entre autres les émissions de polluants et les changements d'usages des terres. Cela implique le recours à des scénarios appelés shared socio-economic pathways (SSP) et représentant des trajectoires d'évolution typiques.
- Les simulations de l'évolution du système climatique qui découle de ces trajectoires sont réalisées par des modèles de climat globaux (GCM ou ESM), à l'origine de deux problèmes. Le premier est lié à leur représentation par nature imparfaite du système climatique. Le second est une inadéquation d'échelle entre, d'une part, la résolution des sorties des GCMs, qui est de l'ordre de

100 km × 100 km à un pas de temps souvent journalier et, d'autre part, le besoin d'une plus grande finesse pour les études d'impact, notamment hydrologiques. Des méthodes dites de "descente d'échelle" permettent de raffiner les sorties des GCMs, mais s'accompagnent également d'incertitudes (voir à ce sujet, Maraun et al., 2010).

- Enfin, la nature chaotique du système climatique (appelée variabilité interne) rend imprédictible l'évolution d'une variable à une échéance de plusieurs décennies, ce qui se traduit par une incertitude affectant les statistiques calculées à cet horizon temporel (valeurs extrêmes par exemple). Une solution consiste à filtrer cette partie chaotique pour n'extraire du signal climatique que la partie "forcée", correspondant à l'effet des forçages anthropiques (au premier rang desquels les gaz à effet de serre tel que le CO<sub>2</sub>). Néanmoins, ce filtrage ne peut être parfait et dépend i) de la capacité des GCMs à représenter la variabilité interne du climat, et ii) du nombre de simulations climatiques effectuées, introduisant à nouveau un compromis entre la quantité de données disponibles et leur précision/réalisme (voir Deser et al., 2020, pour une synthèse à ce sujet).

Il existe enfin une troisième question, plus générale mais découlant des deux premières, ayant à voir avec la façon dont s'opère cette construction d'une base de connaissances scientifiques sur laquelle s'appuyer pour prendre des décisions dans un monde par nature incertain. Il fait aujourd'hui consensus qu'une recherche s'inspirant directement des besoins des acteurs et allant jusqu'à inclure ceux-ci au sein de la démarche scientifique est un moyen efficace de produire une science utile, utilisable et utilisée. C'est le cas de manière générale (Jebeille & Roussos, 2023 ; Pulkkinen et al., 2022) et en particulier en hydrologie (par exemple, Brown et al., 2012). Cette approche, parfois appelée "trans-disciplinaire", se traduit notamment par une participation des parties prenantes aux nombreux choix qui jalonnent le processus de détection-attribution-projection, afin de permettre une meilleure appréhension des multiples sources d'incertitudes et de leurs implications pratiques et, in fine, une meilleure prise en main de l'information climatique (voir par exemple, Parker & Lusk, 2019).

## 5. Conclusions et perspectives

Le réchauffement global se poursuit à un rythme soutenu et parmi les multiples facettes de l'intensification concomitante du cycle de l'eau, l'intensité et la fréquence des précipitations extrêmes augmentent dans le monde entier (Seneviratne et al., 2021). L'accroissement du risque d'inondation qui pourrait en

<sup>3</sup><https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>, voir aussi Pielke et al. (2022).

découler – potentiellement renforcé par d’autres facteurs tels que l’expansion urbaine (Rentschler et al., 2023), les changements d’usage des sols et de comportements individuels et collectifs (Borga et al., 2019) – constitue un enjeu sociétal et scientifique majeur. La communauté hydrologique au sens large est par conséquent confrontée au besoin pressant de revoir ses méthodes et pratiques.

Dans cet article, il est montré comment adapter un outil opérationnel très usité, les courbes intensité-durée-fréquence, afin qu’il intègre l’évolution continue des conditions climatiques, et notamment du régime des précipitations. Ceci permet de fournir des indicateurs dont l’utilité pour la planification de mesures d’adaptation est proportionnelle à l’usage incontournable qui en est fait pour le dimensionnement d’infrastructures et la gestion des risques d’inondation. En s’appuyant sur l’exemple d’une région, le Sahel, où une intensification sans équivoque des extrêmes pluviométriques a été détectée à des échelles de temps allant de l’horaire au journalier, on a explicité la mise au point d’un modèle de distribution de valeurs extrêmes non-stationnaire et le calcul de courbes IDF non-stationnaires qui en découle.

Plusieurs défis, de natures différentes, demeurent. La prise en compte des différentes sources d’incertitude dans l’élaboration d’outils d’aide à la décision pour les stratégies d’adaptation et leur communication aux usagers est un ingrédient clé de l’élaboration d’informations fiables et utiles. Également dans cette optique, il apparaît essentiel de mener des travaux de recherche s’inspirant directement des besoins des utilisateurs et qui reconnaissent leurs valeurs – différentes de celles des scientifiques (impartialité, objectivité, etc) – afin de combler le bien nommé “fossé de l’utilisabilité” (Lemos et al., 2012) et favoriser la co-production de services climatiques (Cash et al., 2003) à la hauteur des défis du changement climatique. Enfin, le maintien de réseaux d’observations de pluie in-situ semble incontournable, ne serait-ce que pour continuer à évaluer les données de télédétection et les modèles climatiques utilisés pour surveiller et prévoir l’évolution climatique en cours et à venir.

## Conflit d’intérêt

Les auteurs déclarent n’avoir aucun conflit d’intérêt.

## Funding

This work was supported by the French Ministry of higher education, research and innovation.

## ORCID

Guillaume Chagnaud  <http://orcid.org/0000-0001-6411-0741>

Jeremy Panthou  <http://orcid.org/0000-0002-6906-3654>

Théo Vischel  <http://orcid.org/0000-0003-4230-4953>

Thierry Lebel  <http://orcid.org/0000-0002-1297-6751>

## Disponibilité des données

Les données ayant servi de support à cette étude sont accessibles sur <http://bd.amma-catch.org/>. Les codes (langage Python) sont rendus progressivement accessibles sur <https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/mnemosyne>.

## Références

- Agilan, V., & Umamahesh, N. V. (2017). What are the best covariates for developing non-stationary rainfall intensity- duration-frequency relationship? *Advances in Water Resources*, 101, 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.12.016>
- Amani, A., & Paturel, J.-E. (2017). Le projet de révision des normes hydrologiques en Afrique de l’Ouest et Afrique Centrale. *La Météorologie*, 96, 6. <https://doi.org/10.4267/2042/61964>
- Balme, M., Vischel, T., Lebel, T., Peugeot, C., & Galle, S. (2006). Assessing the water balance in the Sahel: Impact of small scale rainfall variability on runoff. *Journal of Hydrology*, 331(1–2), 336–348. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.05.020>
- Blanchet, J., Ceresetti, D., Molinié, G., & Creutin, J.-D. (2016). A regional GEV scale-invariant framework for intensity– duration–frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 540, 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.007>
- Borga, M., Comiti, F., Ruin, I., & Marra, F. (2019). Forensic analysis of flash flood response. *WIREs Water*, 6(2), e1338. <https://doi.org/10.1002/wat2.1338>
- Brown, C., Ghile, Y., Laverty, M., & Li, K. (2012). Decision scaling: Linking bottom-up vulnerability analysis with climate projections in the water sector. *Water Resources Research*, 48(9), 2011WR011212. <https://doi.org/10.1029/2011WR011212>
- Cash, D. W., Clark, W. C., Alcock, F., Dickson, N. M., Eckley, N., Guston, D. H., Jäger, J., & Mitchell, R. B. (2003). Knowledge systems for sustainable development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(14), 8086–8091. <https://doi.org/10.1073/pnas.1231332100>
- CEDEAO, Direction des Affaires Humanitaires et Sociales Commission de la. (2020). *Strategie regionale de gestion des risques d’inondation et plan d’action (2020–2025)*. La communauté économique des états de l’Afrique de l’Ouest (CEDEAO).
- Chagnaud, G. (2022). *Évolutions du régime pluviométrique au Sahel Ouest-Africain: détection, éléments d’attribution et projections* [PhD thesis]. Université Grenoble Alpes.
- Chagnaud, G., Panthou, G., Vischel, T., Blanchet, J., & Lebel, T. (2021). A unified statistical framework for detecting trends in multi-timescale precipitation extremes: Application to non-stationary intensity-duration-frequency curves. *Theoretical and Applied Climatology*, 145(1–2), 839–860. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03650-9>
- Chagnaud, G., Panthou, G., Vischel, T., & Lebel, T. (2022). A synthetic view of rainfall intensification in the West African Sahel. *Environmental Research Letters*, 17(4), 044005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4a9c>



- Chagnaud, G., Panthou, G., Vischel, T., & Lebel, T. (2023). Capturing and attributing the rainfall regime intensification in the West African Sahel with CMIP6 models. *Journal of Climate*, 36(6), 1823–1843. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0412.1>
- Cheng, L., & AghaKouchak, A. (2015). Nonstationary precipitation intensity-duration-frequency curves for infrastructure design in a changing climate. *Scientific Reports*, 4(1), 7093. <https://doi.org/10.1038/srep07093>
- Coles, S. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*. Springer Series in Statistics. Springer London.
- Deser, C., Lehner, F., Rodgers, K. B., Ault, T., Delworth, T. L., DiNezio, P. N., Fiore, A., Frankignoul, C., Fyfe, J. C., Horton, D. E., Kay, J. E., Knutti, R., Lovenduski, N. S., Marotzke, J., McKinnon, K. A., Minobe, S., Randerson, J., Screen, J. A., Simpson, I. R., & Ting, M. (2020). Insights from earth system model initial-condition large ensembles and future prospects. *Nature Climate Change*, 10(4), 277–286. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0731-2>
- Elagib, N. A., Zayed, I. S. A., Saad, S. A. G., Mahmood, M. I., Basheer, M., & Fink, A. H. (2021). Debilitating floods in the Sahel are becoming frequent. *Journal of Hydrology*, 599, 126362. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126362>
- Galle, S., Grippa, M., Peugeot, C., Moussa, I. B., Cappelaere, B., Demarty, J., Mougin, E., Panthou, G., Adjomayi, P., Agbossou, E. K., Ba, A., Boucher, M., Cohard, J.-M., Descloitres, M., Descroix, L., Diawara, M., Dossou, M., Favreau, G., Gangneron, F., ... Wilcox, C. (2018). AMMA-CATCH, a critical zone observatory in West Africa monitoring a region in transition. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 1–24. <https://doi.org/10.2136/vzj2018.03.0062>
- Gudmundsson, L., Boulange, J., Do, H. X., Gosling, S. N., Grillakis, M. G., Koutroulis, A. G., Leonard, M., Liu, J., Müller Schmed, H., Papadimitriou, L., Pokhrel, Y., Seneviratne, S. I., Satoh, Y., Thiery, W., Westra, S., Zhang, X., & Zhao, F. (2021). Globally observed trends in mean and extreme river flow attributed to climate change. *Science*, 371(6534), 1159–1162. <https://doi.org/10.1126/science.aba3996>
- Gupta, V. K., & Waymire, E. (1990). Multiscaling properties of spatial rainfall and river flow distributions. *Journal of Geophysical Research*, 95(D3), 1999. <https://doi.org/10.1029/JD095iD03p01999>
- Ham, Y.-G., Kim, J.-H., Min, S.-K., Kim, D., Li, T., Timmermann, A., & Stuecker, M. F. (2023). Anthropogenic fingerprints in daily precipitation revealed by deep learning. *Nature*, 622(7982), 301–307. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06474-x>
- Haruna, A., Blanchet, J., & Favre, A.-C. (2022). Performance-based comparison of regionalization methods to improve the at-site estimates of daily precipitation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(10), 2797–2811. <https://doi.org/10.5194/hess-26-2797-2022>
- HCC. 2023. <https://www.vie-publique.fr/rapport/290091-rapport-annuel-2023-du-haut-conseil-pour-le-climat>
- Jebeile, J., & Roussos, J. (2023). Usability of climate information: Toward a new scientific framework. *WIREs Climate Change*, 14(5), e833. <https://doi.org/10.1002/wcc.833>
- Koutsoyiannis, D., Kozonis, D., & Manetas, A. (1998). A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology*, 206(1–2), 118–135. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00097-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00097-3)
- Lebel, T., Parker, D. J., Flamant, C., Bourlès, B., Marticorena, B., Mougin, E., Peugeot, C., Diedhiou, A., Haywood, J. M., Ngamini, J. B., Polcher, J., Redelsperger, J.-L., & Thorncroft, C. D. (2010). The AMMA field campaigns: Multiscale and multidisciplinary observations in the West African region: The AMMA field campaigns. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136(S1), 8–33. <https://doi.org/10.1002/qj.486>
- Lemos, M. C., Kirchhoff, C. J., & Ramprasad, V. (2012). Narrowing the climate information usability gap. *Nature Climate Change*, 2(11), 789–794. <https://doi.org/10.1038/nclimate1614>
- Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A. M., Chandler, R. E., Kendon, E. J., Widmann, M., Brienen, S., Rust, H. W., Sauter, T., Themeßl, M., Venema, V. K. C., Chun, K. P., Goodess, C. M., Jones, R. G., Onof, C., Vrac, M., & Thiele-Eich, I. (2010). Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, 48(3). <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2009RG000314>
- Menabde, M., Seed, A., & Pegram, G. (1999). A simple scaling model for extreme rainfall. *Water Resources Research*, 35(1), 335–339. <https://doi.org/10.1029/1998WR900012>
- Miller, J., Taylor, C., Guichard, F., Peyrillé, P., Vischel, T., Fowe, T., Panthou, G., Visman, E., Bologo, M., Traore, K., Coulibaly, G., Chapelon, N., Beucher, F., Rowell, D. P., & Parker, D. J. (2022). High-impact weather and urban flooding in the West African Sahel – A multidisciplinary case study of the 2009 event in Ouagadougou. *Weather and Climate Extremes*, 36, 100462. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100462>
- Milly, P. C. D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P., & Stouffer, R. J. (2008). Stationarity is dead: Whither water management? *Science*, 319(5863), 573–574. <https://doi.org/10.1126/science.1151915>
- Myhre, G., Alterskjær, K., Stjern, C. W., Hodnebrog, Ø., Marelle, L., Samsø, B. H., Sillmann, J., Schaller, N., Fischer, E., Schulz, M., & Stohl, A. (2019). Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming. *Scientific Reports*, 9(1), 16063. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52277-4>
- Ouarda, T. B. M. J., Yousef, L. A., & Charron, C. (2019). Non-stationary intensity-duration-frequency curves integrating information concerning teleconnections and climate change. *International Journal of Climatology*, 39(4), 2306–2323. <https://doi.org/10.1002/joc.5953>
- Panthou, G., Lebel, T., Vischel, T., Quantin, G., Sane, Y., Ba, A., Ndiaye, O., Diongue-Niang, A., & Diopkane, M. (2018). Rainfall intensification in tropical semi-arid regions: The Sahelian case. *Environmental Research Letters*, 13(6), 064013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac334>
- Panthou, G., Vischel, T., Lebel, T., Blanchet, J., Quantin, G., & Ali, A. (2012). Extreme rainfall in West Africa: A regional modeling: Extreme rainfall mapping West Africa. *Water Resources Research*, 48(8). <https://doi.org/10.1029/2012WR012052>
- Parker, W. S., & Lusk, G. (2019). Incorporating user values into climate services. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(9), 1643–1650. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0325.1>

- Pendergrass, A. G. (2018). What precipitation is extreme? *Science*, 360(6393), 1072–1073. <https://doi.org/10.1126/science.aat1871>
- Pielke, R., Jr, Burgess, M. G., & Ritchie, J. (2022). Plausible 2005–2050 emissions scenarios project between 2 °C and 3 °C of warming by 2100. *Environmental Research Letters*, 17(2), 024027. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4ebf>
- Pulkkinen, K., Undorf, S., Bender, F., Wikman-Svahn, P., Doblas-Reyes, F., Flynn, C., Hegerl, G. C., Jönsson, A., Leung, G.-K., Roussos, J., Shepherd, T. G., & Thompson, E. (2022). The value of values in climate science. *Nature Climate Change*, 12(1), 4–6. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01238-9>
- Rentschler, J., Avner, P., Marconcini, M., Su, R., Strano, E., Vousdoukas, M., & Hallegatte, S. (2023). Global evidence of rapid urban growth in flood zones since 1985. *Nature*, 622(7981), 87–92. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06468-9>
- Salas, J. D., Obeysekera, J., & Vogel, R. M. (2018). Techniques for assessing water infrastructure for nonstationary extreme events: A review. *Hydrological Sciences Journal*, 63(3), 325–352. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1426858>
- Sane, Y., Panthou, G., Bodian, A., Vischel, T., Lebel, T., Dacosta, H., Quantin, G., Wilcox, C., Ndiaye, O., Diongue-Niang, A., & Diop Kane, M. (2018). Intensity–duration–frequency (IDF) rainfall curves in Senegal. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(7), 1849–1866. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1849-2018>
- Sarhadi, A., & Soulis, E. D. (2017). Time-varying extreme rainfall intensity-duration-frequency curves in a changing climate. *Geophysical Research Letters*, 44(5), 2454–2463. <https://doi.org/10.1002/2016GL072201>
- Schlef, K. E., Kunkel, K. E., Brown, C., Demissie, Y., Lettenmaier, D. P., Wagner, A., Wigmosta, M. S., Karl, T. R., Easterling, D. R., Wang, K. J., François, B., & Yan, E. (2023). Incorporating non-stationarity from climate change into rainfall frequency and intensity-duration-frequency (IDF) curves. *Journal of Hydrology*, 616, 128757. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128757>
- Scholes, R. J. (2020). The future of semi-arid regions: A weak fabric unravels. *Climate*, 8(3), 43. <https://doi.org/10.3390/cli8030043>
- Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A., Ghosh, S., Iskandar, I., Kossin, J., Lewis, S., Otto, F., Pinto, I., Satoh, M., Vicente-Serrano, S. M., Wehner, M., & Zhou, B. (2021). Weather and climate extreme events in a changing climate. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Svensson, C., & Jones, D. A. (2010). Review of rainfall frequency estimation methods: Review of rainfall frequency estimation methods. *Journal of Flood Risk Management*, 3(4), 296–313. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2010.01079.x>
- Taylor, C. M., Belušić, D., Guichard, F., Parker, D. J., Vischel, T., Bock, O., Harris, P. P., Janicot, S., Klein, C., & Panthou, G. (2017). Frequency of extreme Sahelian storms tripled since 1982 in satellite observations. *Nature*, 544(7651), 475–478. <https://doi.org/10.1038/nature22069>
- Tebaldi, C., Wehner, M., Leung, R., & Lawrence, D. (2023). Is land use producing robust signals in future projections from Earth system models, all else being equal? *Environmental Research Letters*, 18(8), 084009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ace3da>
- Vischel, T., Panthou, G., Peyrillé, P., Roehrig, R., Quantin, G., Lebel, T., Wilcox, C., Beucher, F., & Budiarti, M. (2019). Chapter 4 - precipitation extremes in the West African Sahel: Recent evolution and physical mechanisms. In V. Venugopal, J. Sukhatme, R. Murtugudde, & R. Roca (Eds.), *Tropical extremes* (pp. 95–138). Elsevier.
- Wasko, C., Westra, S., Nathan, R., Orr, H. G., Villarini, G., Villalobos Herrera, R., & Fowler, H. J. (2021). Incorporating climate change in flood estimation guidance. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 379(2195), 20190548. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0548>
- Wehner, M., Gleckler, P., & Lee, J. (2020). Characterization of long period return values of extreme daily temperature and precipitation in the CMIP6 models: Part 1, model evaluation. *Weather and Climate Extremes*, 30, 100283. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100283>
- Zipser, E. J., Cecil, D. J., Liu, C., Nesbitt, S. W., & Yorty, D. P. (2006). Where are the most intense thunderstorms on earth? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(8), 1057–1072. <https://doi.org/10.1175/BAMS-87-8-1057>