

Rapport de stage

Caractérisation et évolution des précipitations extrêmes horaires en France

à partir d'un modèle régional de climat à convection profonde résolue

Decoopman Nicolas

—

Encadrement

Juliette Blanchet (IGE, CNRS) et Antoine Blanc (RTM)

UGA M2 SSD

29 août 2025

Contexte

Réchauffement de la planète

- Plus fort sur les continents que les océans
($+1^{\circ}\text{C}$ monde, $+1,7^{\circ}\text{C}$ France, $+2^{\circ}\text{C}$ Alpes françaises)
- L'air chaud contient plus de vapeur avant saturation (CC $+7\%/\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- L'air chaud monte, se refroidit ($-10^{\circ}\text{C}/\text{km}$), l'eau se condense (rosée)

En réponse au réchauffement

- Augmentation *théorique* des précipitations extrêmes
- Variable suivant les changements de circulations atmosphériques

Utilisation de modèles de climat sur de longues périodes

- Changement climatique vs. variabilité climatique
- Données horaires à partir de 1990-2000
- Convection-Permitting, **R**egional **C**limate **M**odel (2,5km - 1h)
- Modèle numérique **A**pplication of **R**esearch to **O**perations at **M**Esoscale
forcer par réanalyse ERA5

Intérêt de l'étude dans le paysage scientifique

Peu de documentation des tendances des extrêmes horaires

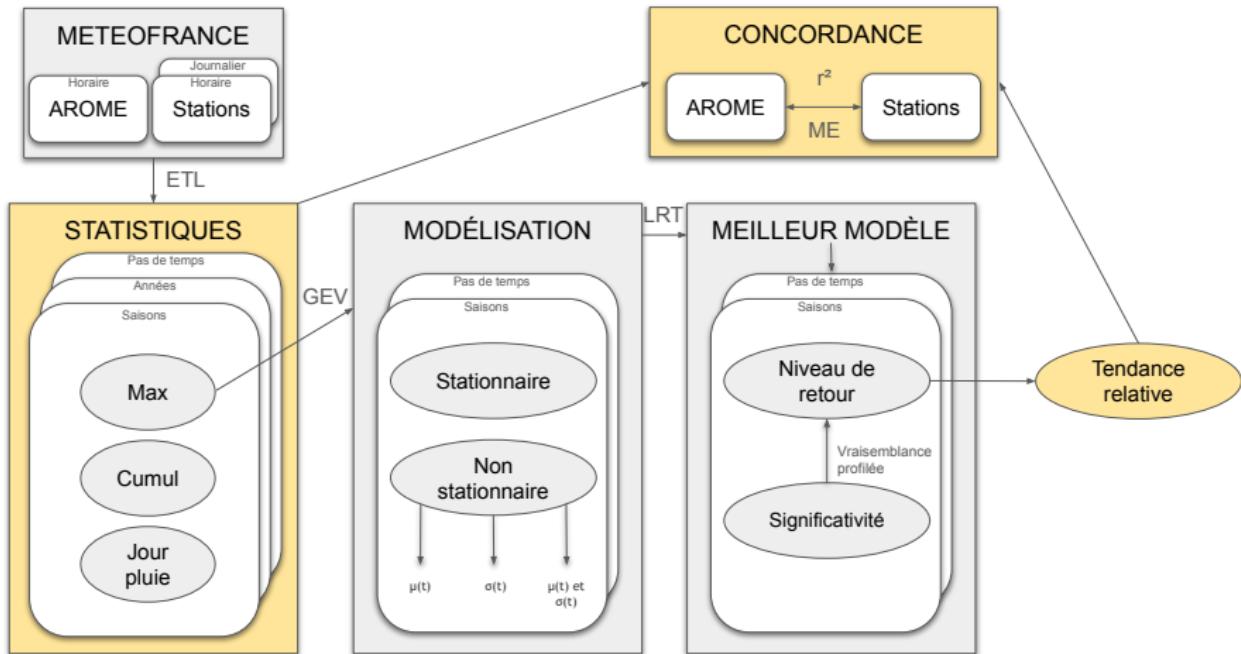
- Faible durée des séries horaires disponibles
- Complexité physique des processus convectifs à l'origine de ces extrêmes

La validité des extrêmes simulés par ce modèle n'a jamais été évalué

Objectifs

- Evaluer la capacité du modèle AROME à reproduire les extrêmes horaires observés
- Caractériser l'évolution des extrêmes horaires dans un contexte de réchauffement climatique

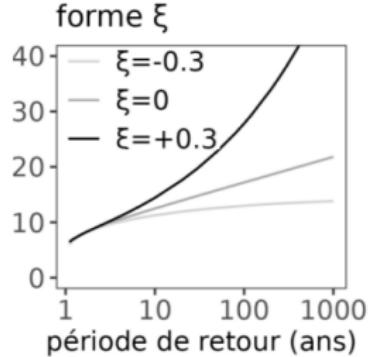
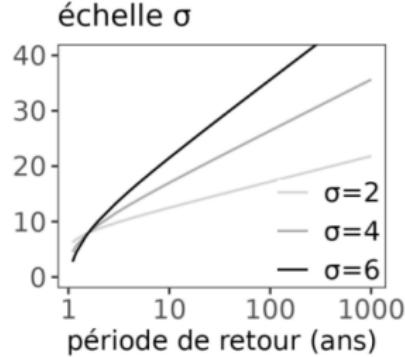
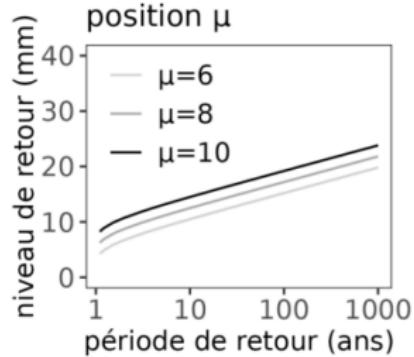
Méthodologie



Méthodologie

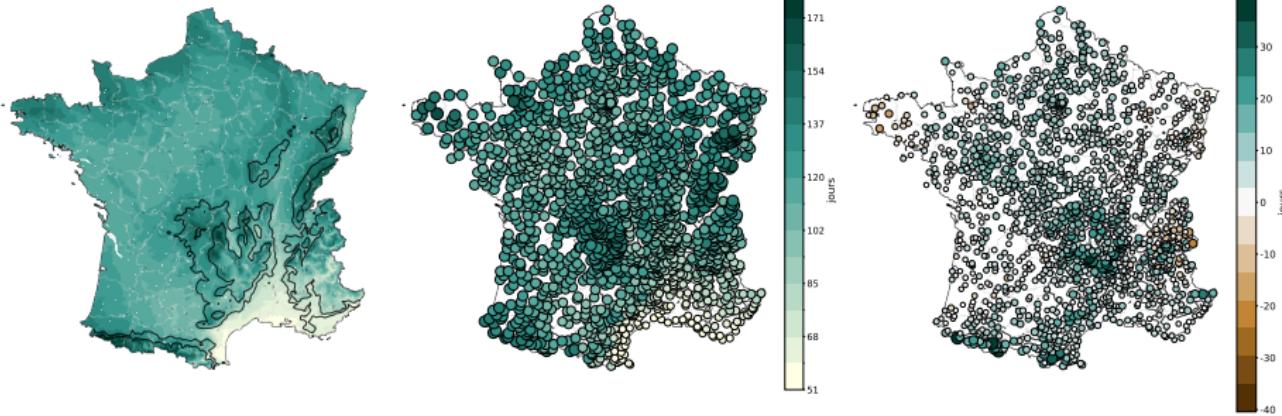
Soit $X \sim \text{GEV}(\mu, \sigma, \xi)$ et le niveau de retour z_T de la période T , alors en notant F^{-1} la fonction quantile de la GEV, on obtient :

$$z_T = F^{-1} \left(1 - \frac{1}{T} \right) = \begin{cases} \mu + \frac{\sigma}{\xi} \left[\left(-\log \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right)^{-\xi} - 1 \right] & \text{si } \xi \neq 0 \\ \mu - \sigma \log \left(-\log \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right) & \text{si } \xi = 0 \end{cases} \quad (\text{Gumbel})$$



Statistiques descriptives

Nombre de jours par an de précipitations (1959-2022) (n = 1583) (HYDRO)



$$r = 0.95$$

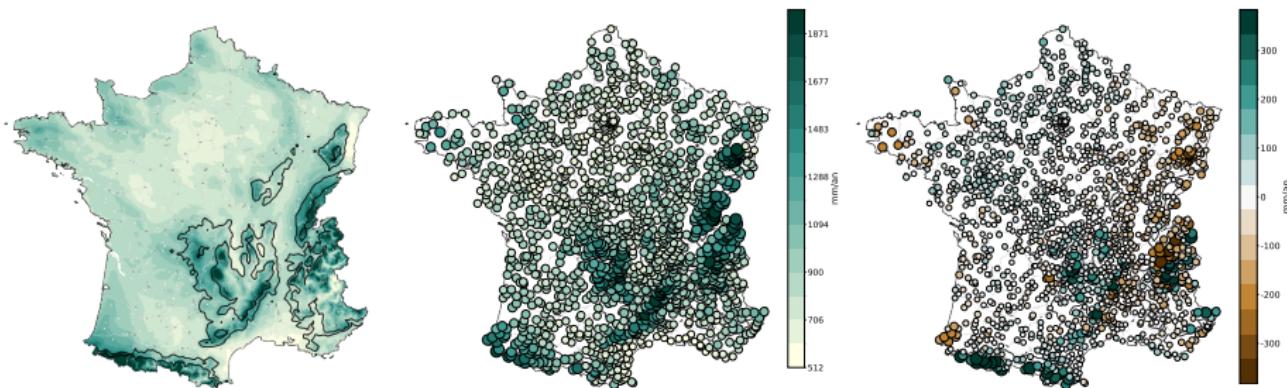
Δ (AROME - Stations) de 1959 à 2022 : +6.35 jours (+5.56%)

Δ (AROME - Stations) de 1990 à 2022 : +2.82 jours (+2.50%)

Tendance à déclencher des jours de pluie plus fréquemment que ce qui est observé

Statistiques descriptives

Cumul annuel des précipitations (1959-2022) ($n = 1583$) (HYDRO) à l'échelle quotidienne



$$r = 0.94$$

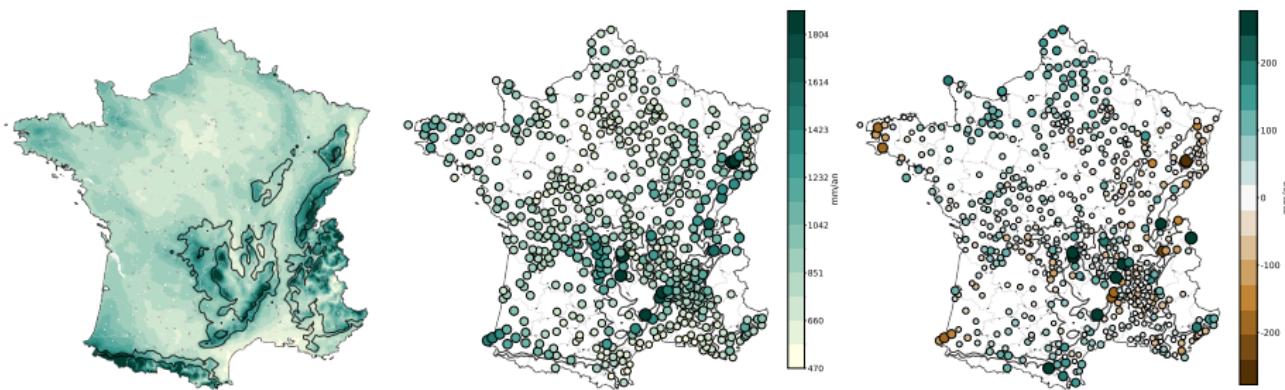
Δ (AROME - Stations) de 1959 à 2022 : +11.48 mm/an (+1.23%)

Δ (AROME - Stations) de 1990 à 2022 : -22.88 mm/an (-2.49%)

Répartition correcte de la quantité totale d'eau

Statistiques descriptives

Cumul annuel des précipitations (1990-2022) ($n = 574$) (HYDRO) à l'échelle horaire

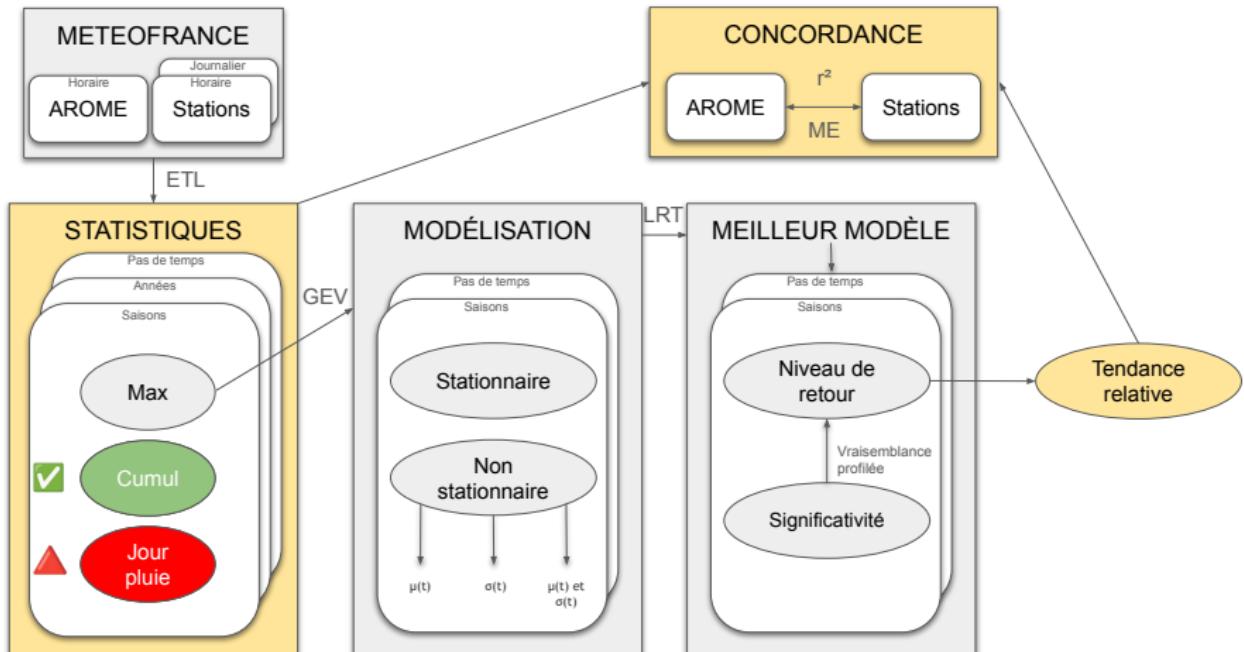


$$r = 0.94$$

Δ (AROME - Stations) de 1990 à 2022 : +22.67 mm/an (+2.64%)

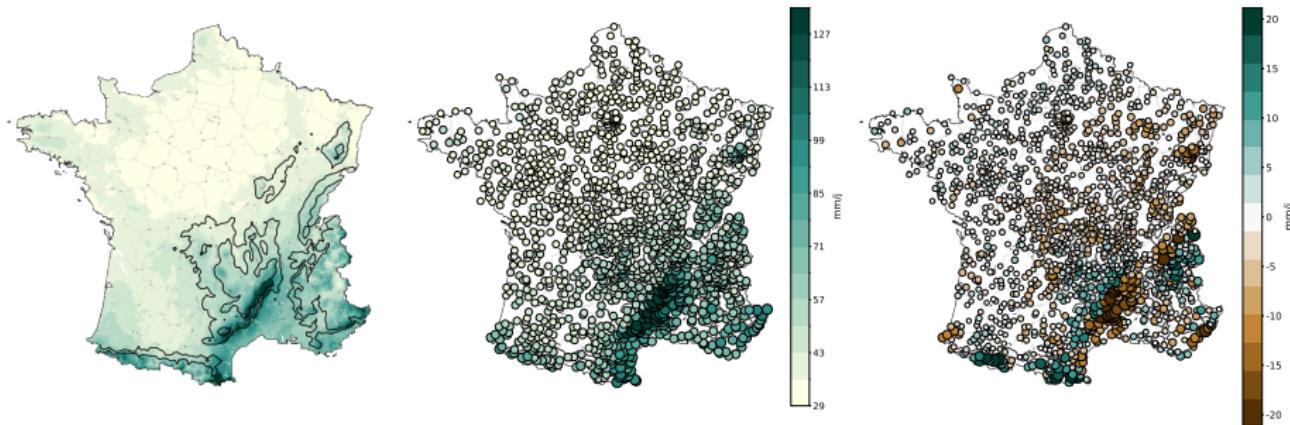
Résultats semblables

Pluies plus fréquentes en plus faibles quantités



Statistiques descriptives

Moyenne des maxima journaliers des précipitations (1959-2022) (n = 1583)
(HYDRO)



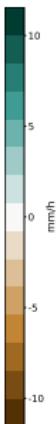
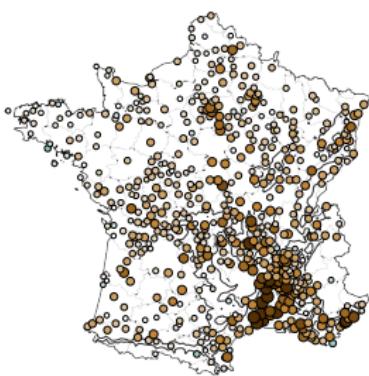
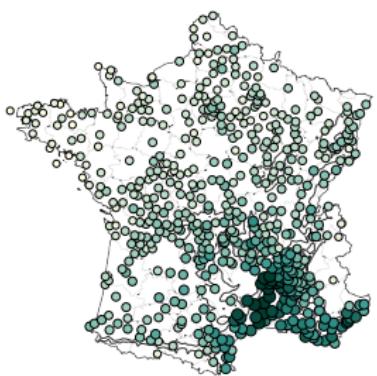
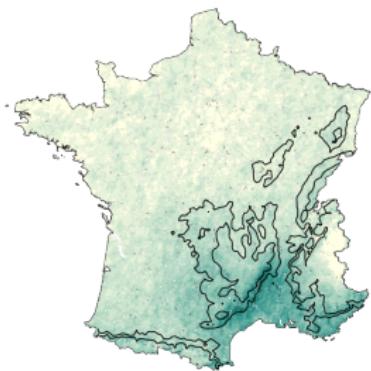
$$r = 0.96$$

Δ (AROME - Stations) de 1959 à 2022 : -1.18 mm/j (-2.35%)

Δ (AROME - Stations) de 1990 à 2022 : -2.54 mm/j (-5.04%)

Statistiques descriptives

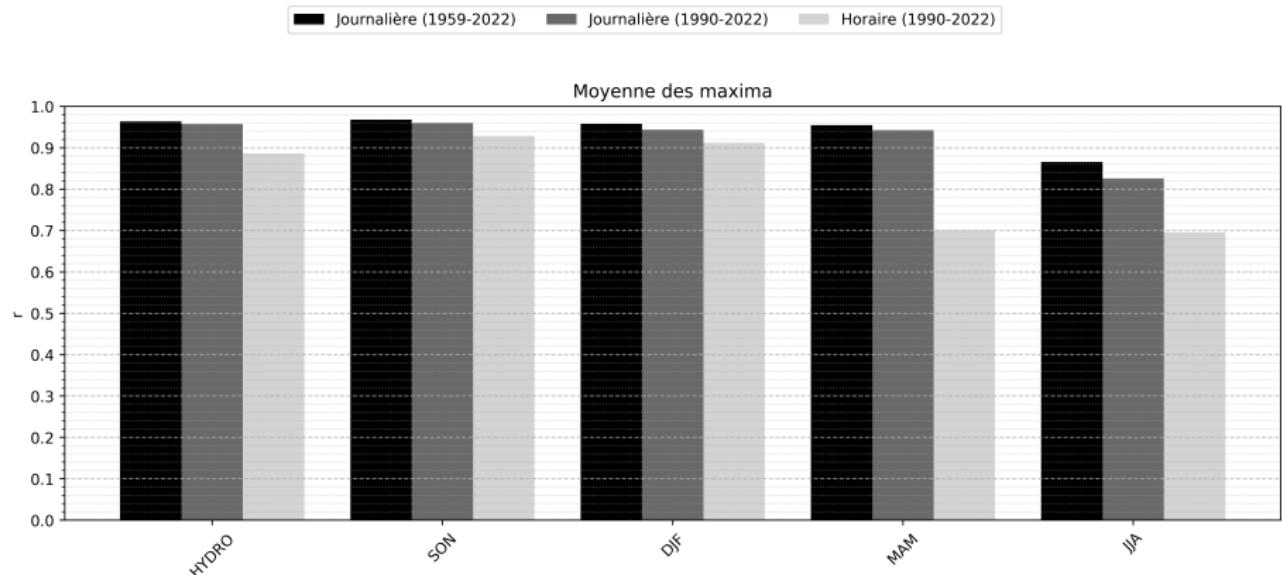
Moyenne des maxima horaires des précipitations (1990-2022) (n = 574)
(HYDRO)



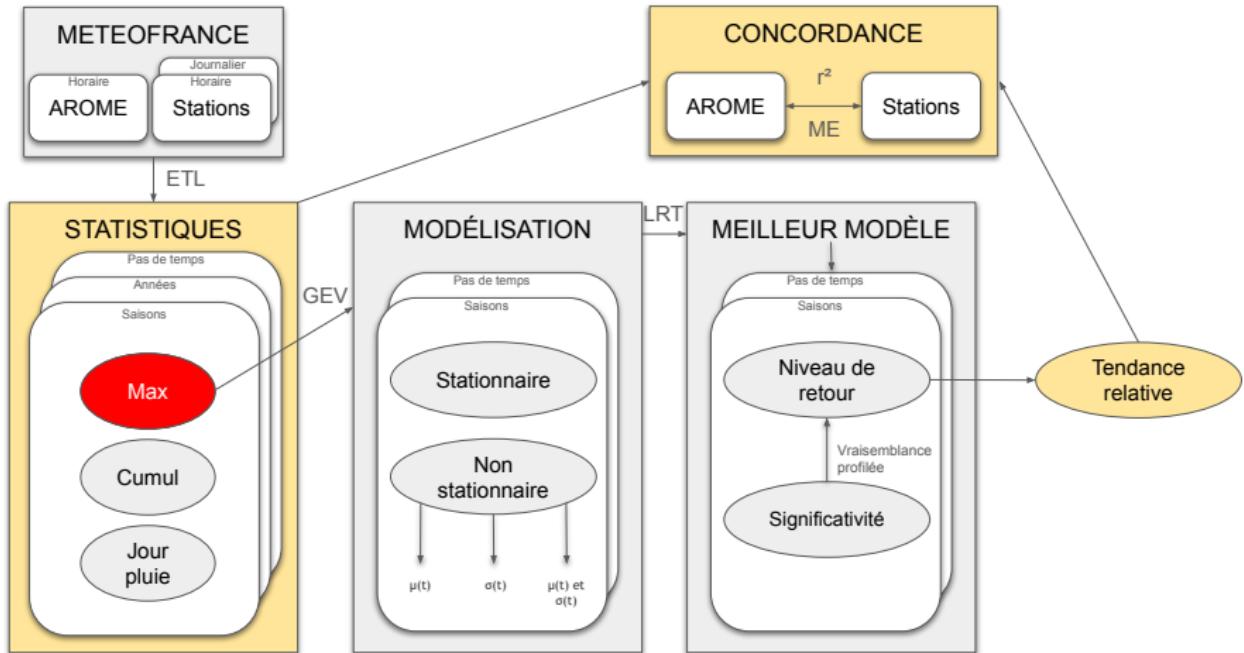
$$r = 0.89$$

Δ (AROME - Stations) de 1990 à 2022 : -3.42 mm/h (-18.65%)

Moyenne des maxima des précipitations suivant la saison et l'échelle temporelle

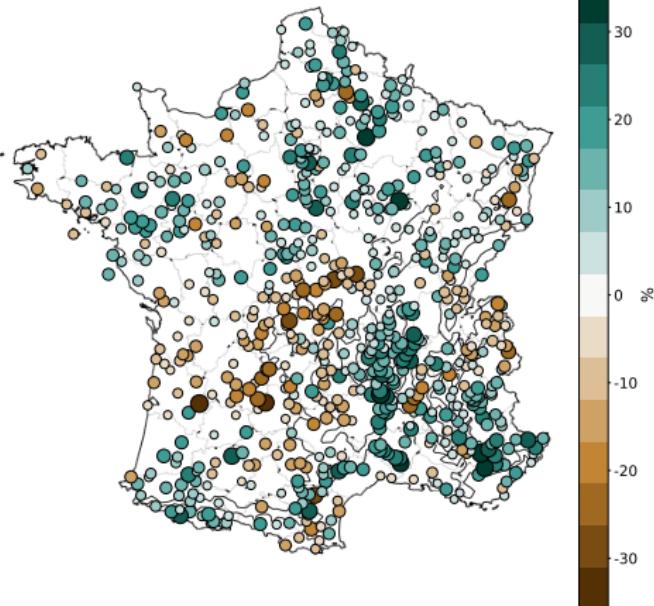
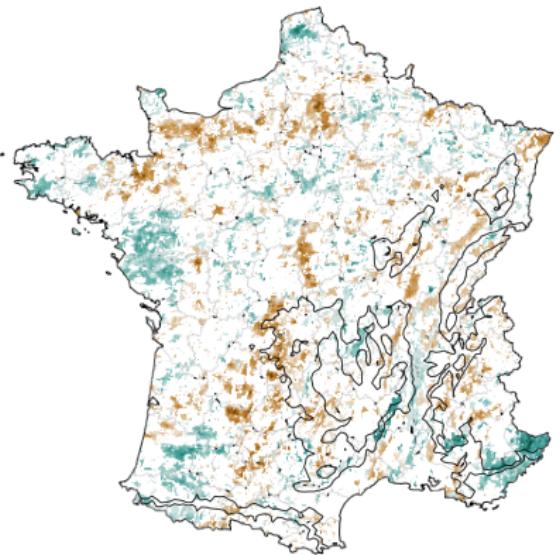


Bonne distribution et difficulté évènementielle



Tendances des précipitations extrêmes journalières

Tendances relatives de 1995 à 2022 du niveau de retour 10 ans (HYDRO)



$r = 0.24$ ($n = 250$)
ME = -4.87%

Tendances des précipitations extrêmes journalières

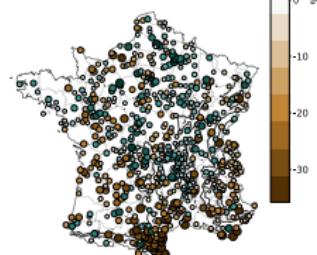
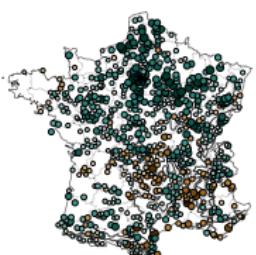
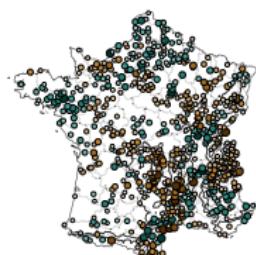
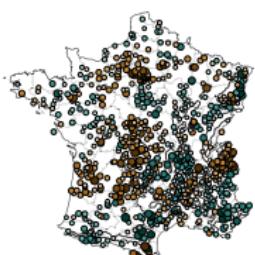
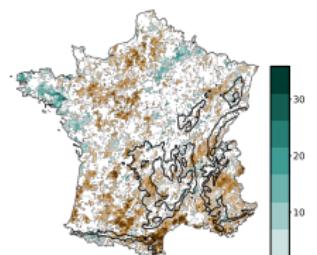
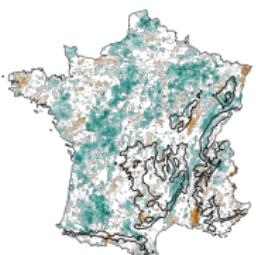
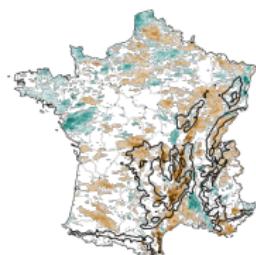
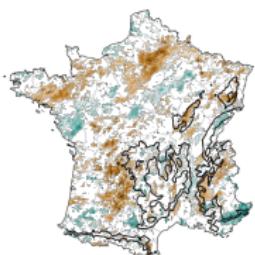
Tendances relatives de 1995 à 2022 du niveau de retour 10 ans

SON

DJF

MAM

JJA



$r = 0.31$ ($n = 305$)
 $ME = -3.01\%$

$r = 0.39$ ($n = 353$)
 $ME = -2.76\%$

$r = 0.19$ ($n = 344$)
 $ME = -2.42\%$

$r = 0.21$ ($n = 272$)
 $ME = -5.58\%$

Tendances des précipitations extrêmes horaires

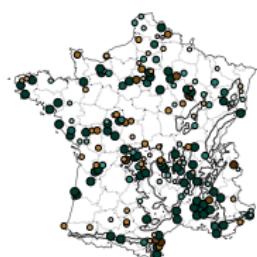
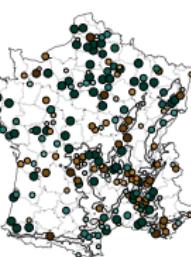
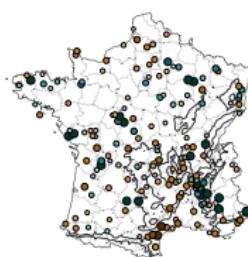
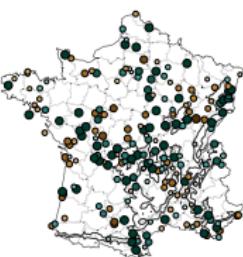
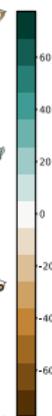
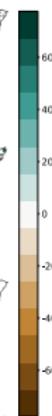
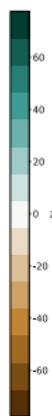
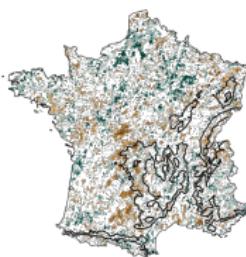
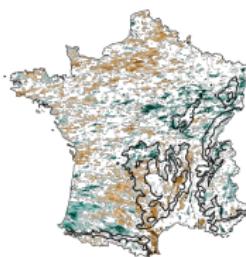
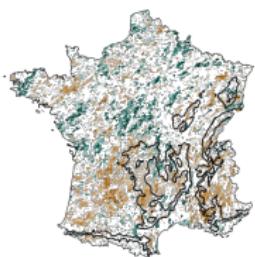
Tendances relatives de 1995 à 2022 du niveau de retour 10 ans

SON

DJF

MAM

JJA



$r = 0.12$ ($n = 81$)
 $ME = -14.40\%$

$r = 0.06$ ($n = 59$)
 $ME = +6.53\%$

$r = -0.20$ ($n = 84$)
 $ME = -18.71\%$

$r = -0.07$ ($n = 54$)
 $ME = -11.83\%$

Tendances des précipitations extrêmes horaires

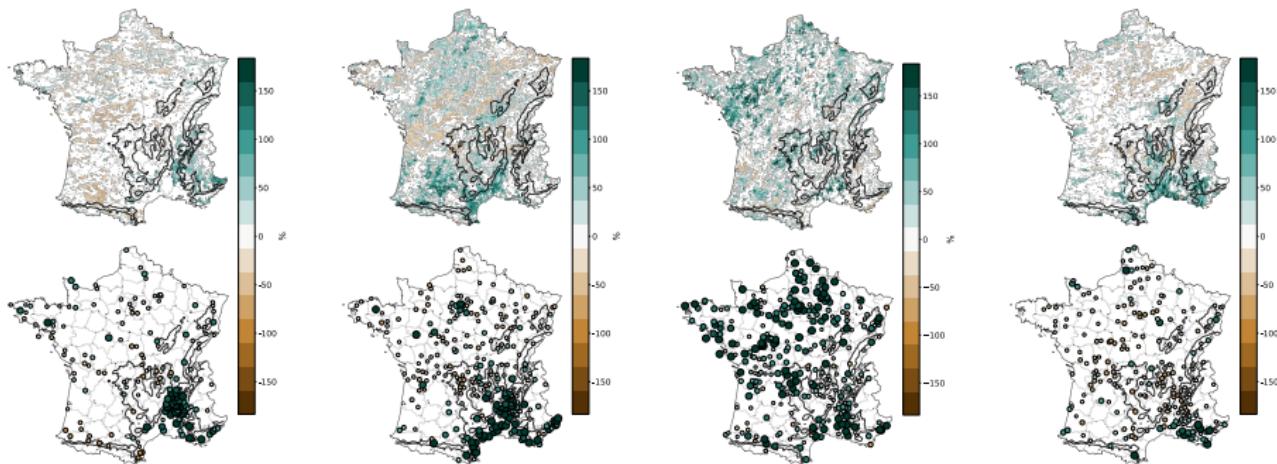
Tendances relatives de 1995 à 2022 du niveau de retour 10 ans

FEV

MAR

JUI

NOV



$r = 0.66$ ($n = 51$)
 $ME = -56.07\%$

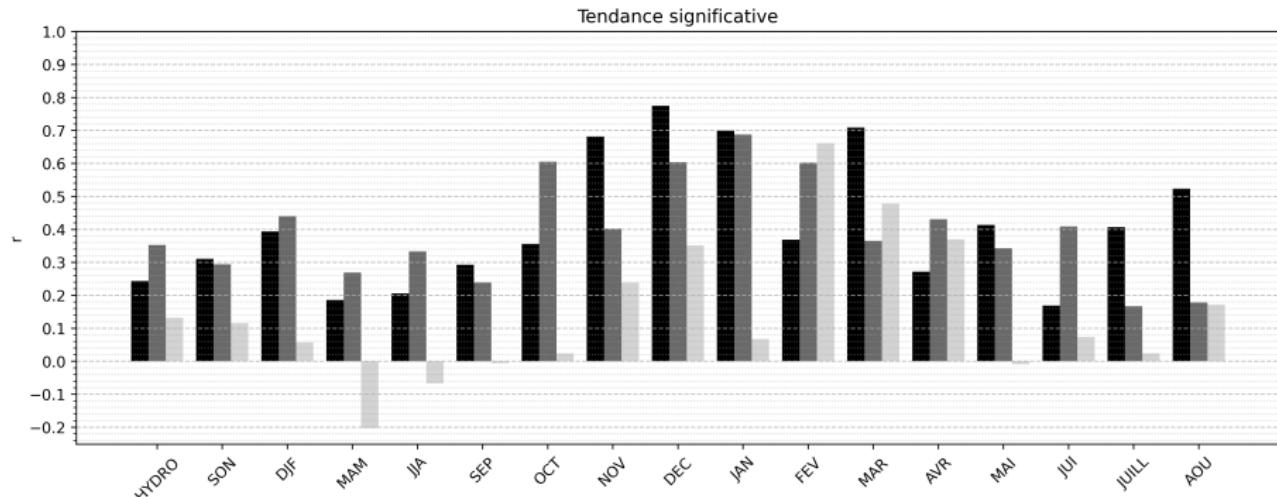
$r = 0.48$ ($n = 136$)
 $ME = -23.33\%$

$r = 0.07$ ($n = 121$)
 $ME = -71.53\%$

$r = 0.24$ ($n = 72$)
 $ME = +8.65\%$

Corrélations des tendances relatives

■ Journalière (1959-2022) ■ Journalière (1990-2022) ■ Horaire (1990-2022)



- Saisonnalité récurrente de la performance (DJF, DEC, JAN, MAR) vs. les valeurs les plus basses (MAM, JUI, JUILL)
- Hiérarchie cohérence spatiale des échelles temporelles : journalière vs. horaire

Discussion

Représentation des extrêmes sous-estimés

- En été, à l'échelle horaire [1], [2]
- Données COMEPHORE (1 km, 15 min, Météo-France) mais ne débutent qu'en 1997 avec une qualité médiocre sur les Alpes avant 2007 [3]

Tendances des extrêmes journaliers cohérents

- Hausse globale du niveau de retour 10 ans (+6,7%) [4]
- Intensification confirmée dans le Sud-Est et Alpes du Sud [5]
- Projections nationales plus fortes dans le Nord (+20% pour +4°C [6])

Tendances des extrêmes horaires hétérogènes

- Faible confiance dans une hausse globale des extrêmes sous-journaliers [4]
- AROME sous-estime les pics horaires vs. stations captent des pointes marquées (+7 à +14 %/°C)
- Les tendances de températures AROME sont deux fois plus faibles que les tendances observées (Chev  M.)

Conclusion

AROME forcé par ERA5

- Structure spatiale des précipitations est captée (r élevée)
- Biais locaux notables dans certains reliefs
- Une sous-représentation marquée des événements convectifs estivaux
- Simule correctement la climatologie et les principaux forçages dynamiques

Les tendances apportent un diagnostic contrasté

- Journalière : AROME sous-estime leur amplitude de 2-5%
- Horaire : hétérogène, peu significatif et faiblement corrélé aux observations
- Indices d'intensification : vallée du Rhône et arc méditerranéen

L'étude rejoint la littérature internationale

Difficulté de dégager des tendances robustes sur les extrêmes horaires

- Longueur limitée des séries
- Hétérogénéité des processus convectifs

References

- [1] C. Caillaud, S. Somot, A. Alias, et al., « Modelling Mediterranean heavy precipitation events at climate scale : an object-oriented evaluation of the CNRM-AROME convection-permitting regional climate model », *Climate Dynamics*, vol. 56, p. 1717-1752, 2021, doi : 10.1007/s00382-020-05558-y.
- [2] N. Poncet et al., « Does a convection-permitting regional climate model bring new perspectives on the projection of Mediterranean floods ? », *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 24, n° 4, p. 1163-1183, 2024, doi : 10.5194/nhess-24-1163-2024.
- [3] Q. Fumière et al., « Extreme rainfall in Mediterranean France during the fall : added value of the CNRM-AROME Convection-Permitting Regional Climate Model », *Climate Dynamics*, vol. 55, p. 77-91, 2020, doi : 10.1007/s00382-019-04898-8.
- [4] IPCC, *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis*. Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2021. doi : 10.1017/9781009157896.
- [5] J. Blanchet, A. Blanc, et J.-D. Creutin, « Explaining recent trends in extreme precipitation in the Southwestern Alps by changes in atmospheric influences », *Weather and Climate Extremes*, vol. 33, p. 100356, 2021, doi : 10.1016/j.wace.2021.100356.
- [6] J.-M. Soubeyroux et al., « À quel climat s'adapter en France selon la TRACC ? partie 2 », Meteo-France, avr. 2025. Disponible sur : <https://hal.science/hal-04991790>