

# 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

## Réchauffement de la planète

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

## En réponse au réchauffement

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

## Pourquoi un modèle de climat sur de longues périodes ?

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

## 1. Tendances des extrêmes horaires peu documentées

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

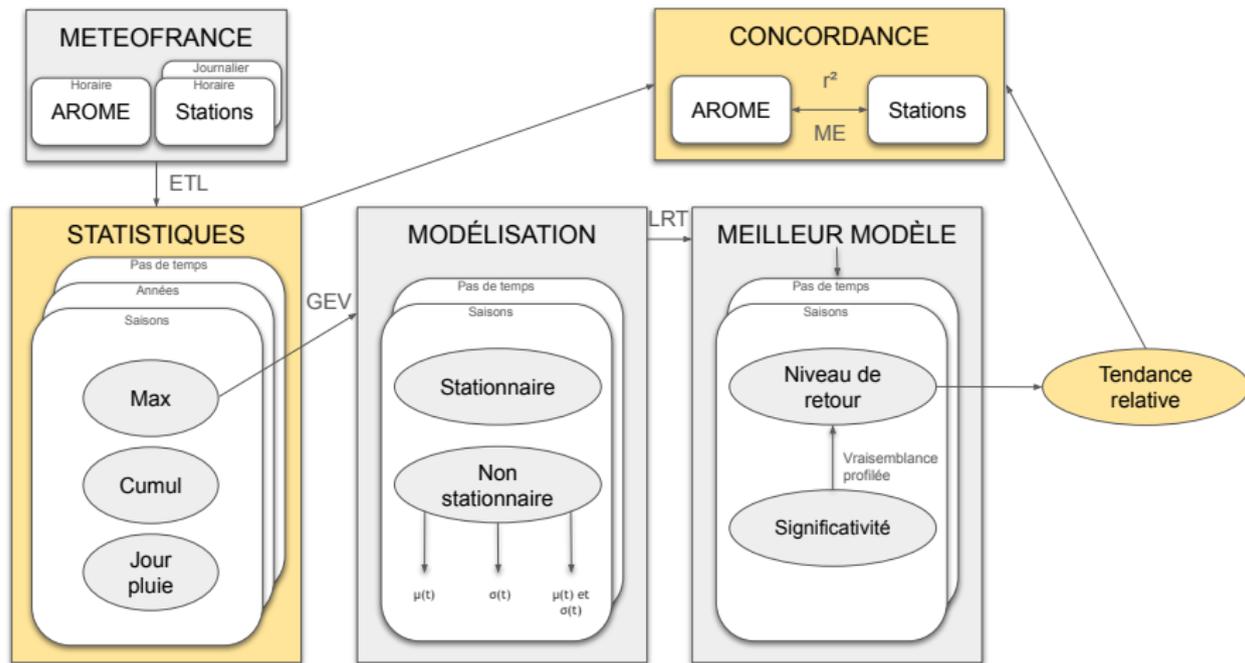
## 2. Validité des extrêmes simulés par ce modèle

Jamais évaluée

## Objectifs

- Evaluer AROME (ERA5) à reproduire les extrêmes horaires
- Evolution des extrêmes horaires dans un contexte de réchauffement climatique

# Méthodologie de l'étude



# Méthodologie de modélisation statistique

$t \in \mathbb{N} \mid t_{\min} \leq t \leq t_{\max}$  la covariable temporelle normalisée

## Modèle stationnaire

$M_0(\theta_0)$  et  $\theta_0 = (\mu_0, \sigma_0, \xi_0)$  avec  $\mu(t) = \mu_0$ ;  $\sigma(t) = \sigma_0$ ;  $\xi(t) = \xi_0$

## Modèles non stationnaires

$$\begin{array}{ccc} M_1(\theta_1) & M_2(\theta_2) & M_3(\theta_3) \\ \theta_1 = (\mu_0, \mu_1, \sigma_0, \xi_0) & \theta_2 = (\mu_0, \sigma_0, \sigma_1, \xi_0) & \theta_3 = (\mu_0, \mu_1, \sigma_0, \sigma_1, \xi_0) \\ \begin{cases} \mu(t) = \mu_0 + \mu_1 t \\ \sigma(t) = \sigma_0 \\ \xi(t) = \xi_0 \end{cases} & \begin{cases} \mu(t) = \mu_0 \\ \sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_1 t \\ \xi(t) = \xi_0 \end{cases} & \begin{cases} \mu(t) = \mu_0 + \mu_1 t \\ \sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_1 t \\ \xi(t) = \xi_0 \end{cases} \end{array}$$

Lorsqu'un point de rupture noté  $t_+$  est introduit, on note :

$$t^* = \begin{cases} 0 & \text{si } t \leq t_+ \\ t & \text{si } t > t_+ \end{cases}$$

## Soit

- $\ell_s$  = log-vraisemblance du modèle stationnaire  $M_s$
- $\ell_{ns}$  = log-vraisemblance du modèle non-stationnaire  $M_{ns}$

## Test du rapport de vraisemblance

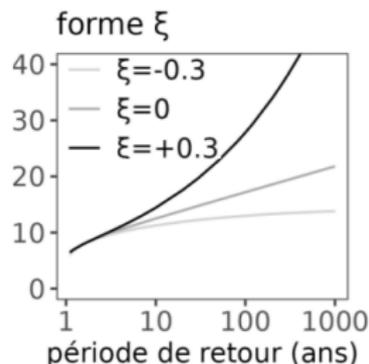
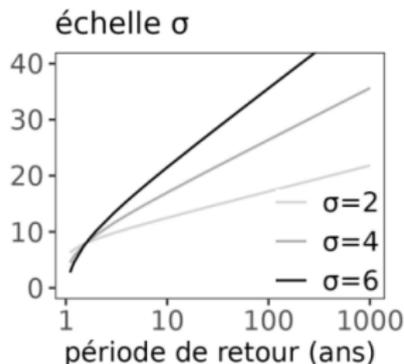
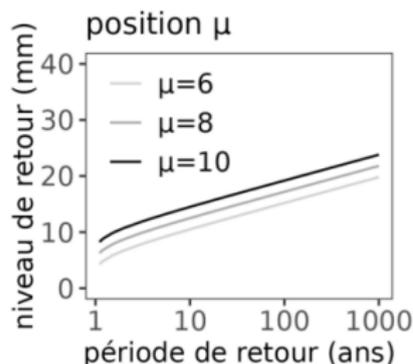
- 1  $k = \dim(\theta_{ns}) - \dim(\theta_s)$
- 2  $\Lambda = 2(\ell_{ns} - \ell_s)$
- 3  $H_0$  (le modèle stationnaire suffit),  $\Lambda$  suit une loi du **chi-carré** avec  $k$  ddl
- 4  $p = \mathbb{P}(\chi_k^2 \geq \Lambda)$

## Procédure de sélection

- Si  $M_3$  ou  $M_3^*$  a  $p \leq 0.10$ , on retient celui qui a la plus petite p-value
- Sinon, on retient le modèle (parmi tous) qui a la plus petite p-value

# Méthodologie du calcul du niveau de retour

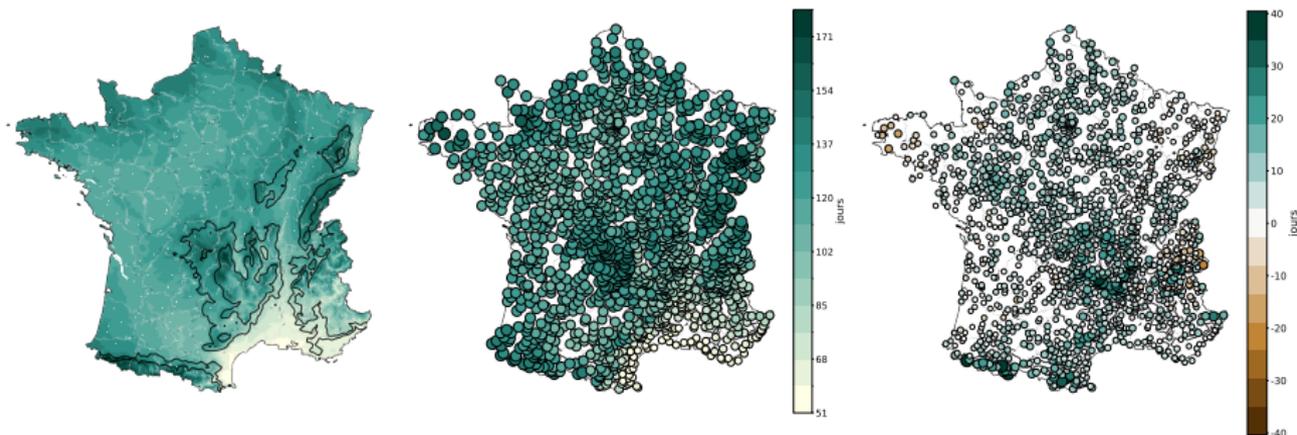
$$z_T = F^{-1} \left( 1 - \frac{1}{T} \right) = \begin{cases} \mu + \frac{\sigma}{\xi} \left[ \left( -\log \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right)^{-\xi} - 1 \right] & \text{si } \xi \neq 0 \\ \mu - \sigma \log \left( -\log \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right) & \text{si } \xi = 0 \quad (\text{Gumbel})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



## Avec

- $X \sim \text{GEV}(\mu, \sigma, \xi)$
- Le niveau de retour  $z_T$  de la période  $T$
- La fonction quantile de la GEV  $F^{-1}$

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



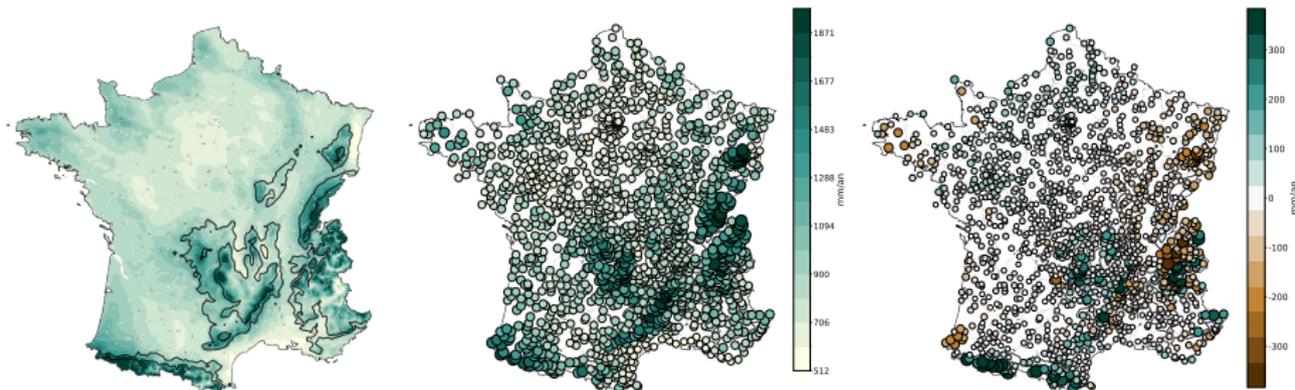
$$r = 0.95$$

$\Delta$  (AROME - Stations) de 1959 à 2022 : +6.35 jours (+5.56%)

$\Delta$  (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**

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



$$r = 0.94$$

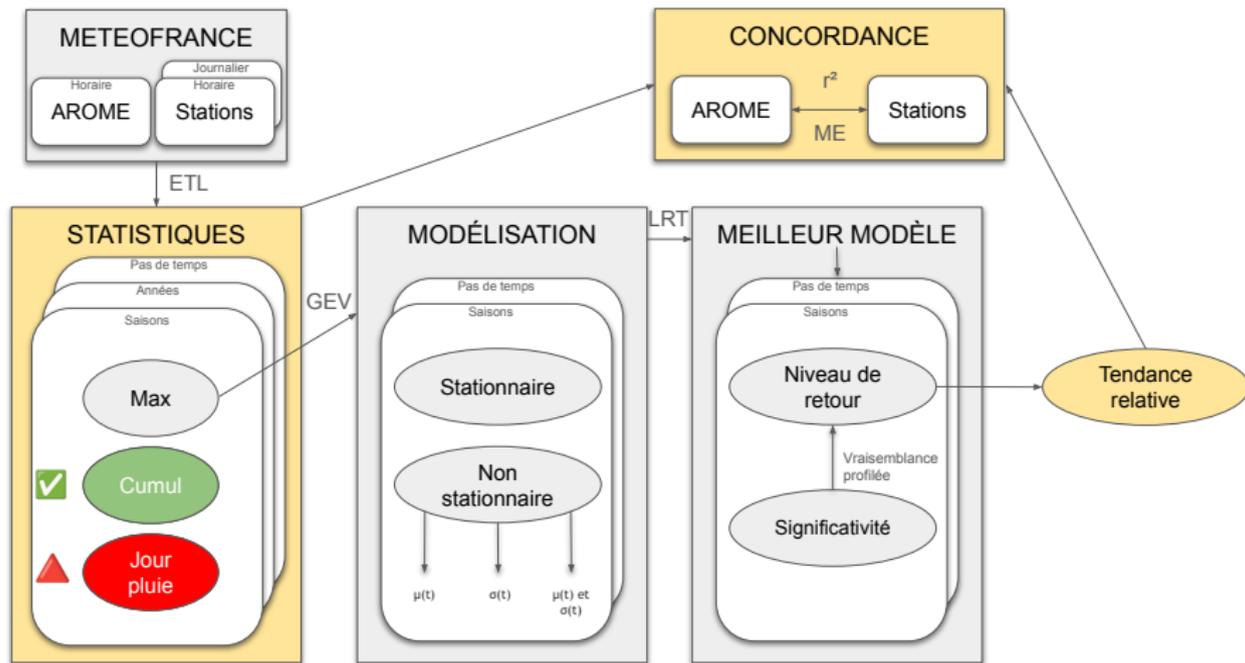
$\Delta$  (AROME - Stations) de 1959 à 2022 : +11.48 mm/an (+1.23%)

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

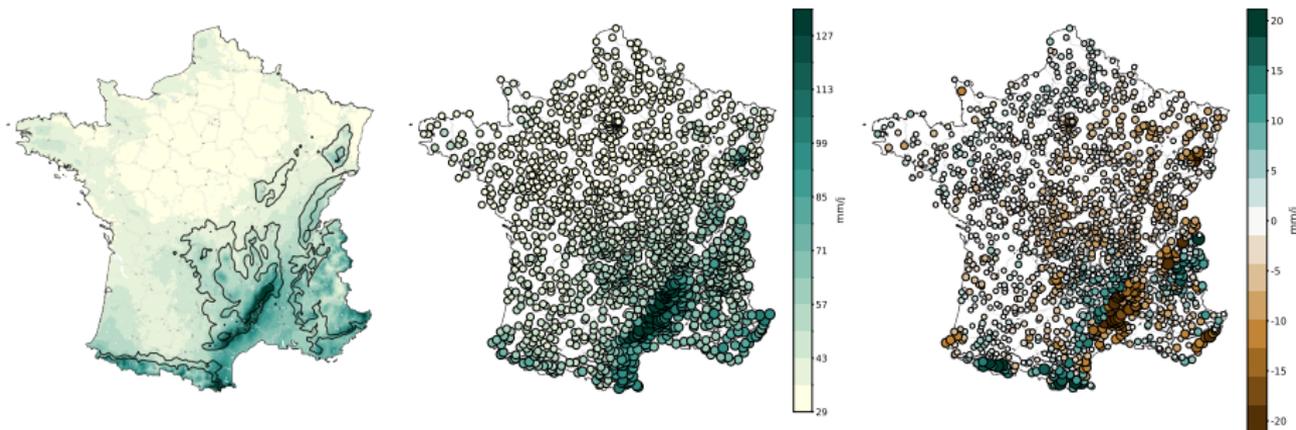
**Répartition correcte de la quantité totale d'eau**

Résultats semblables à l'échelle horaire (1990-2022)

# Pluies plus fréquentes en plus faibles quantités



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



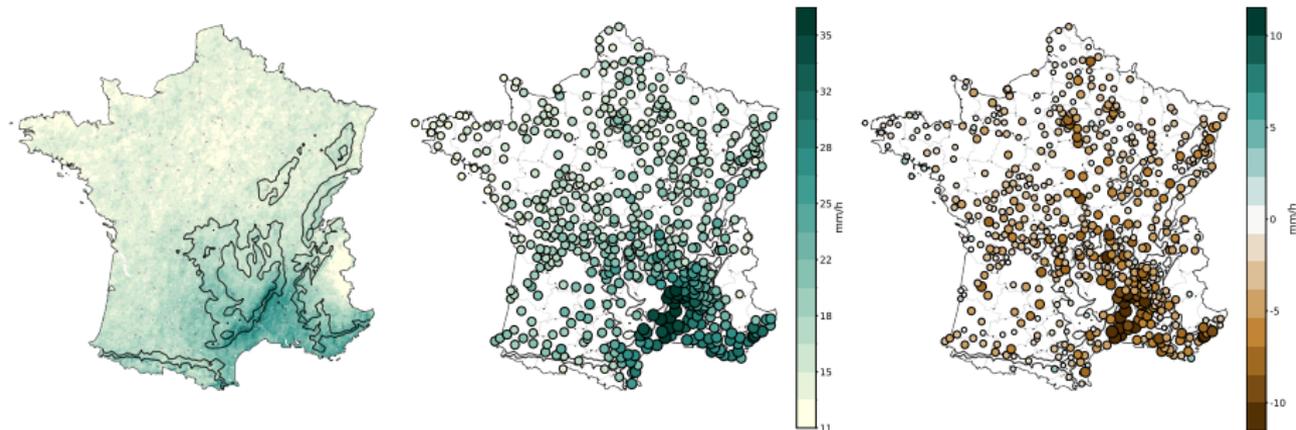
$$r = 0.96$$

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

$\Delta$  (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)



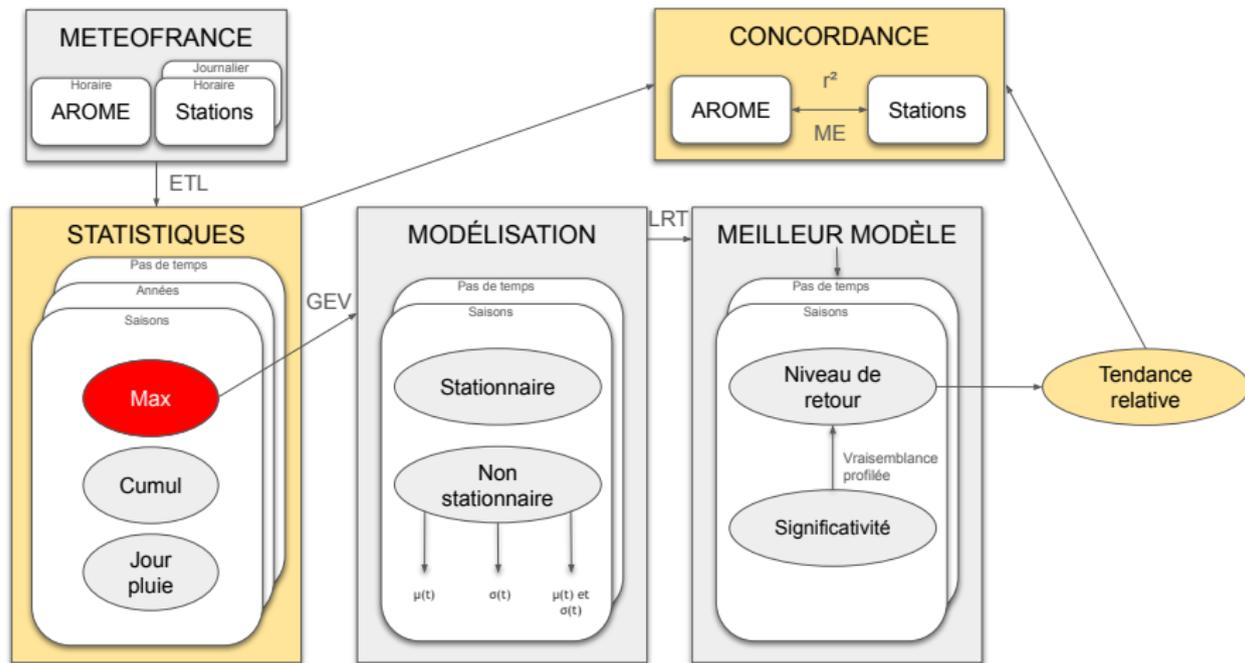
$$r = 0.89$$

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

Cohérence avec la littérature ([1], [2])

Sous-estime précipitations d'intensité élevées (>40 mm/h)

# Bonne distribution et difficulté événementielle



# Tendances des précipitations extrêmes journalières

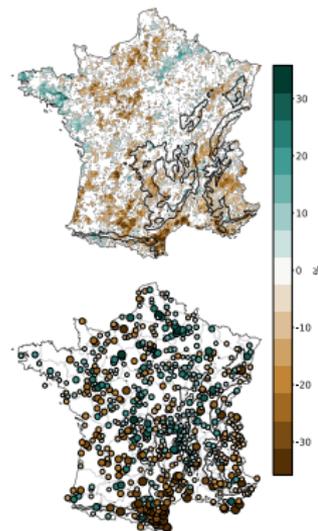
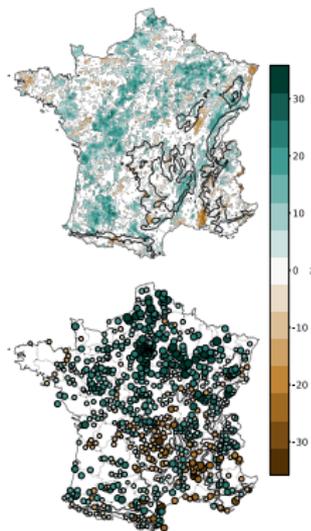
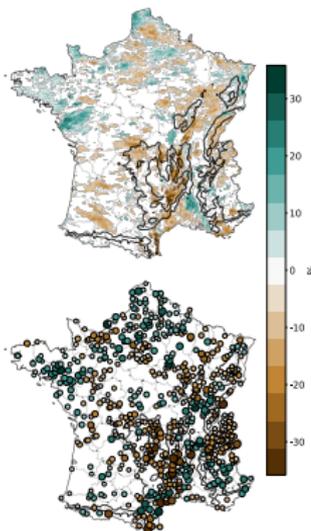
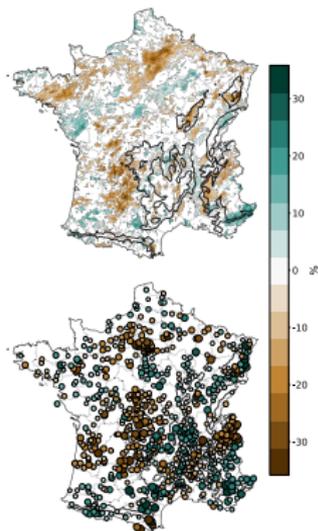
## Tendances relatives de 1995 à 2022 du niveau de retour 10 ans

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)  
 $ME = -5.58\%$

IPCC, 2021 [3]

Hausse globale de la Terre (71%) du niveau de retour 10 ans (+6,7%)

J. Blanchet, A. Blanc, et J.-D. Creutin, 2021 [4]

Intensification confirmée dans le Sud-Est et Alpes du Sud

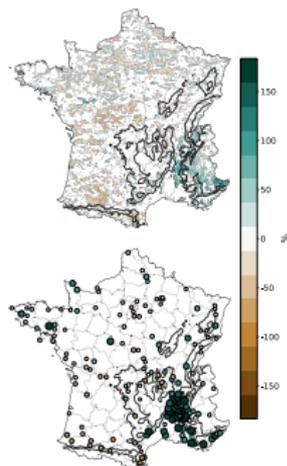
J.-M. Soubeyrou *et al.*, 2025 [5]

Projections nationales plus fortes dans le Nord (+20% pour +4°C)

# Tendances des précipitations extrêmes horaires

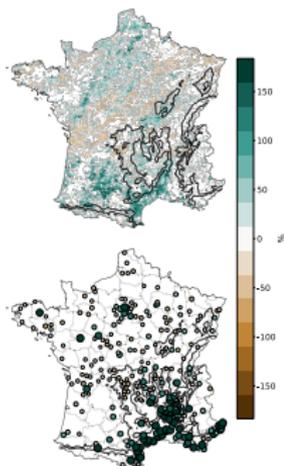
Tendances relatives de 1995 à 2022 du niveau de retour 10 ans

FEV



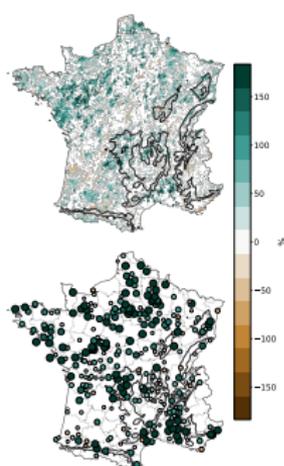
$r = 0.66$  ( $n = 51$ )  
 $ME = -56.07\%$

MAR



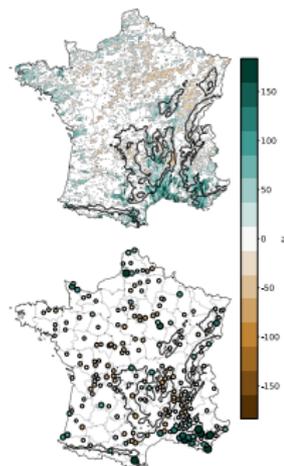
$r = 0.48$  ( $n = 136$ )  
 $ME = -23.33\%$

JUI



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

NOV



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

# Une importante hétérogénéité

## IPCC, 2021 [3]

Faible confiance dans une hausse globale des extrêmes horaires

## P. Molnar et al., 2015 [6]

- Sensibilités horaires de +7 à +14%/°C (supérieures CC) pour des orages convectifs brefs
- AROME sous-estime les pics horaires vs. stations captent des pointes marquées

## M. Chevé, 2025 (stage)

Les tendances de températures AROME sont deux fois plus faibles que les tendances observées

# 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 apporte un diagnostic contrasté

- Confirmation à l'échelle journalière
- Hétérogénéité, peu significatif et faiblement corrélé à l'échelle horaire
- 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

- [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] IPCC, *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis*. Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2021. doi : 10.1017/9781009157896.
- [4] 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.
- [5] J.-M. Soubeyrou *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>
- [6] P. Molnar *et al.*, « Relation of intense rainstorm properties to temperature », *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 19, p. 1753-1766, 2015.