

# 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

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

- Données horaires à partir de 1990-2000
- Changement climatique vs. variabilité climatique
- **Convection-Permitting, Regional Climate Model** ( $2,5\text{km} - 1\text{h}$ )
- Modèle numérique **Application of Research to Operations at M**Esoscale  
forcer par réanalyse ERA5

# Intérêt de l'étude dans le paysage scientifique

## 1. Tendances des extrêmes horaires peu documentées

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

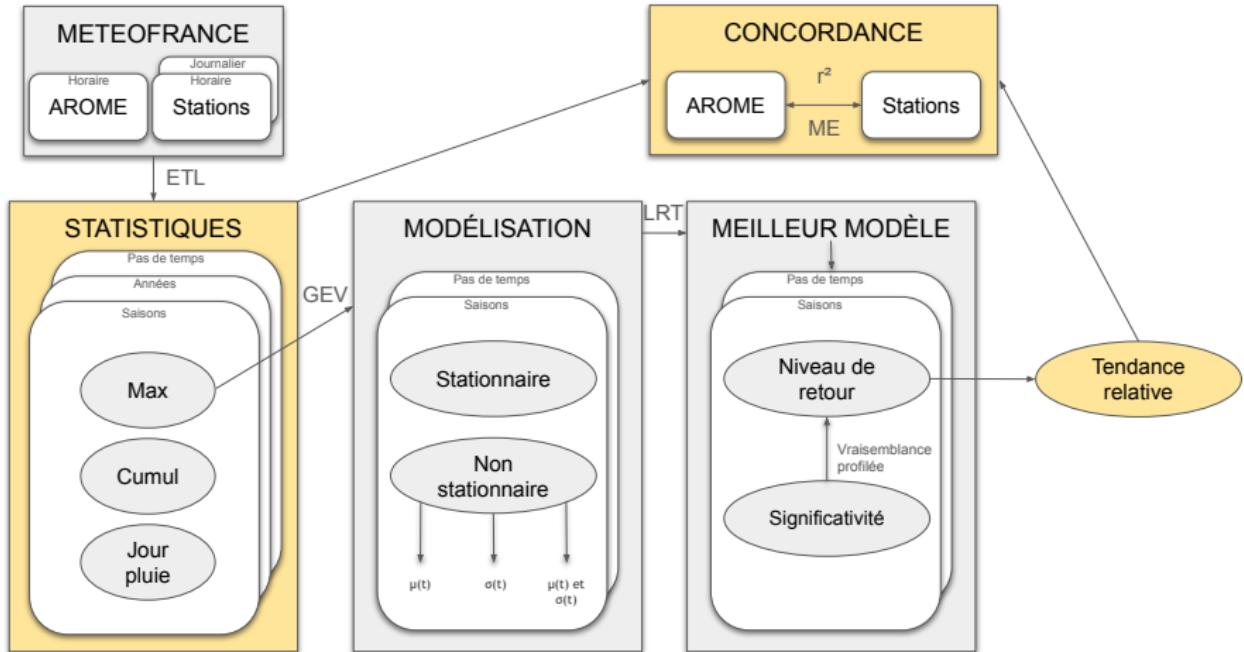
## 2. Validité des extrêmes simulés par ce modèle

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

$$\begin{aligned} M_1(\theta_1) \\ \theta_1 = (\mu_0, \mu_1, \sigma_0, \xi_0) \\ \begin{cases} \mu(t) = \mu_0 + \mu_1 t \\ \sigma(t) = \sigma_0 \\ \xi(t) = \xi_0 \end{cases} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_2(\theta_2) \\ \theta_2 = (\mu_0, \sigma_0, \sigma_1, \xi_0) \\ \begin{cases} \mu(t) = \mu_0 \\ \sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_1 t \\ \xi(t) = \xi_0 \end{cases} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_3(\theta_3) \\ \theta_3 = (\mu_0, \mu_1, \sigma_0, \sigma_1, \xi_0) \\ \begin{cases} \mu(t) = \mu_0 + \mu_1 t \\ \sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_1 t \\ \xi(t) = \xi_0 \end{cases} \end{aligned}$$

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

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

# Méthodologie du choix du modèle

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

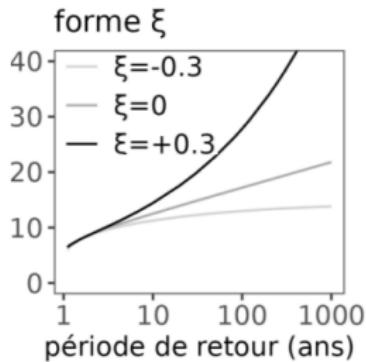
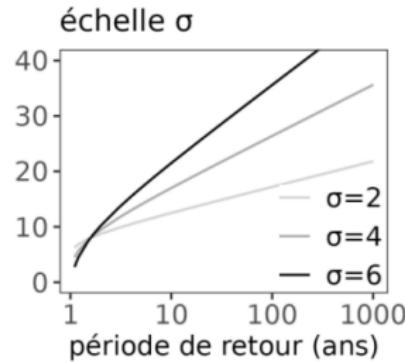
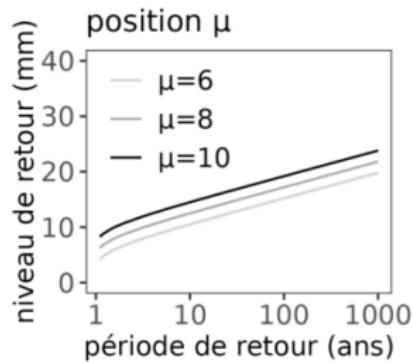
- ➊  $k = \dim(\theta_{ns}) - \dim(\theta_s)$
- ➋  $\Lambda = 2(\ell_{ns} - \ell_s)$
- ➌  $H_0$  (le modèle stationnaire suffit),  $\Lambda$  suit une loi du **chi-carré** avec  $k$  ddl
- ➍  $p = \mathbb{P}(\chi_k^2 \geq \Lambda)$

## 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

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

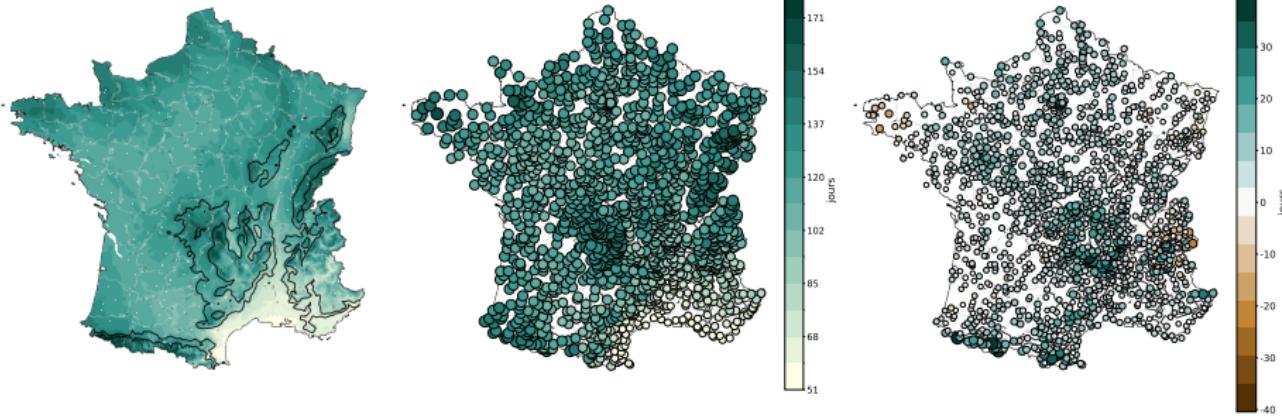


Avec

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

# Statistiques descriptives

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



$$r = 0.95$$

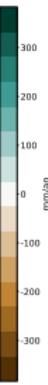
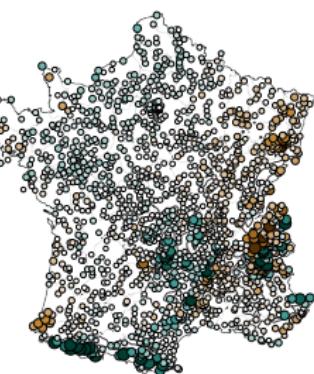
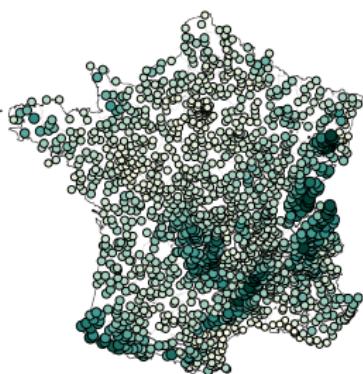
$\Delta$  (AROME - Stations) de 1959 à 2022 : +6.35 jours (+5.56%)

$\Delta$  (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**

# Statistiques descriptives

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



$$r = 0.94$$

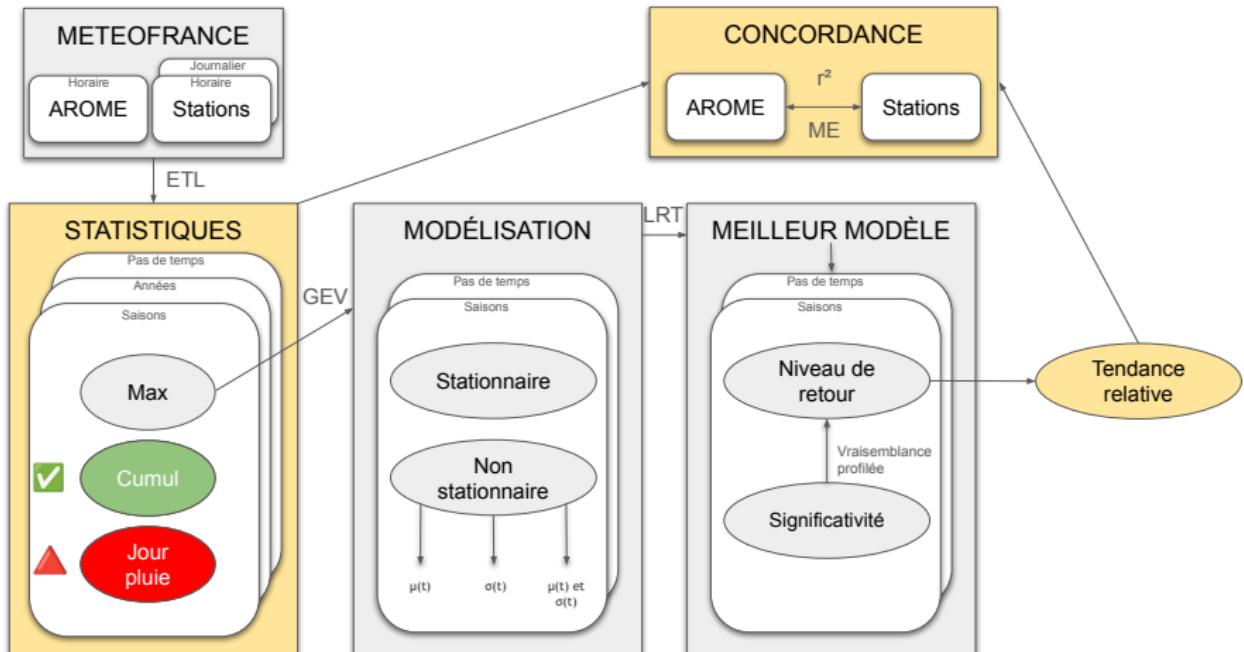
$\Delta$  (AROME - Stations) de 1959 à 2022 : +11.48 mm/an (+1.23%)

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

## Répartition correcte de la quantité totale d'eau

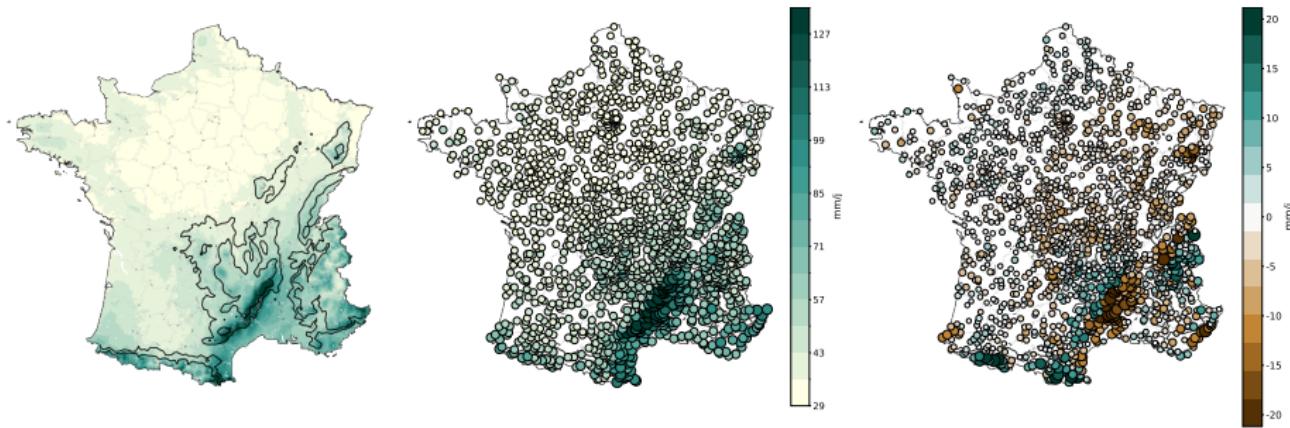
Résultats semblables à l'échelle horaire (1990-2022)

# Pluies plus fréquentes en plus faibles quantités



# Statistiques descriptives

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

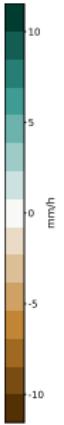
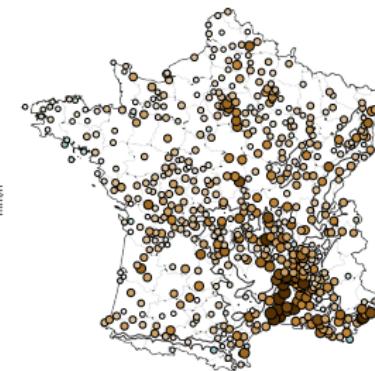
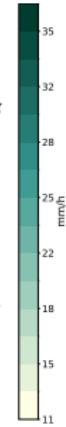
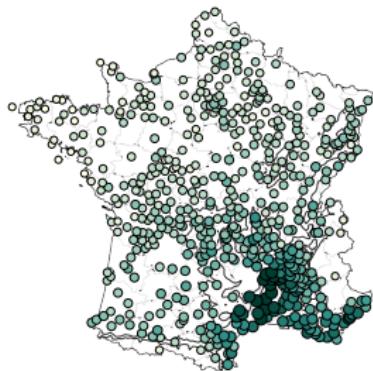


$$r = 0.96$$

$\Delta$  (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)



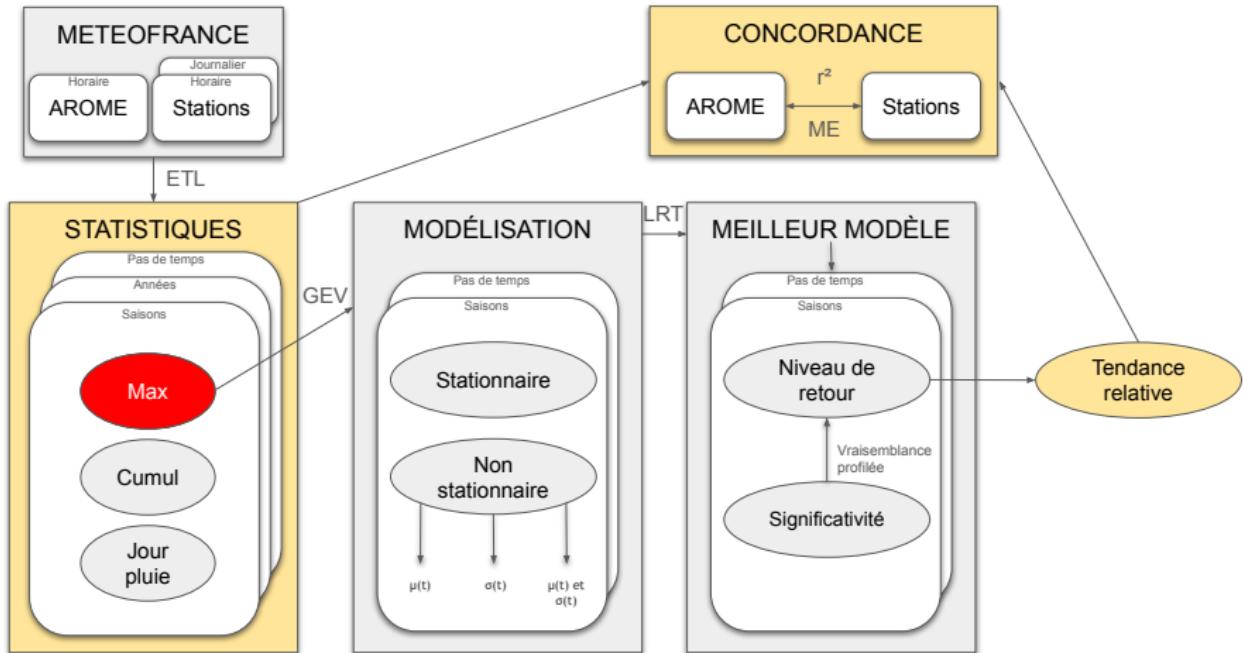
$r = 0.89$

$\Delta$  (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 évènementielle



# Tendances des précipitations extrêmes journalières

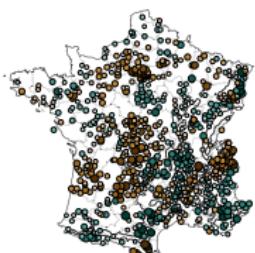
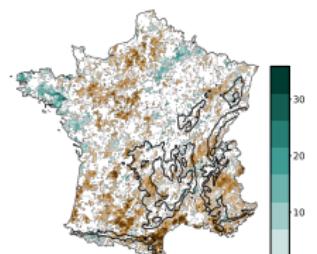
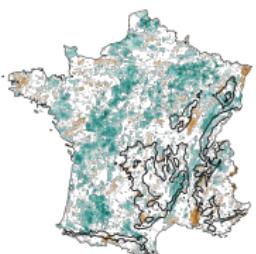
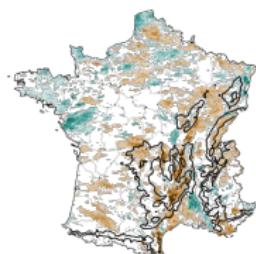
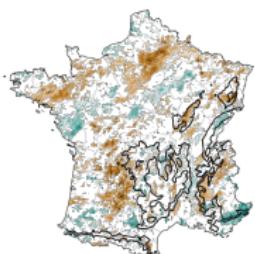
## Tendances relatives de 1995 à 2022 du niveau de retour 10 ans

SON

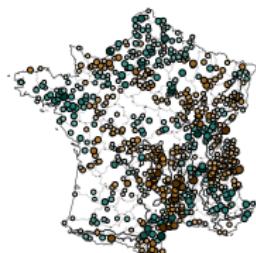
DJF

MAM

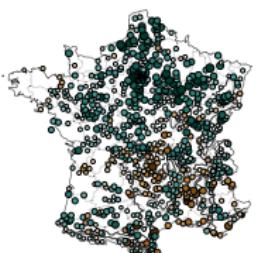
JJA



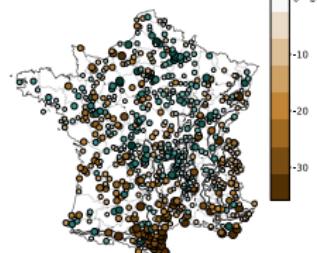
$r = 0.31$  ( $n = 305$ )  
 $ME = -3.01\%$



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



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



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

# Une cohérence avec la littérature

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. Soubeyroux *et al.*, 2025 [5]

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

# Tendances des précipitations extrêmes horaires

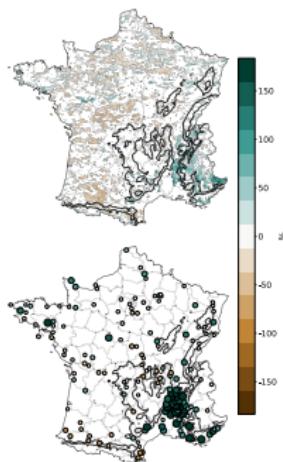
## Tendances relatives de 1995 à 2022 du niveau de retour 10 ans

FEV

MAR

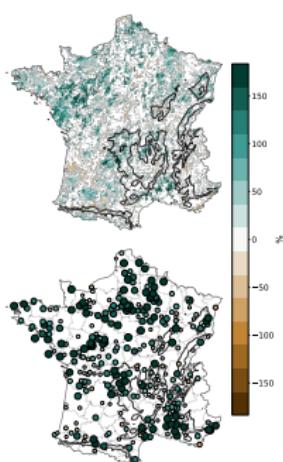
JUI

NOV

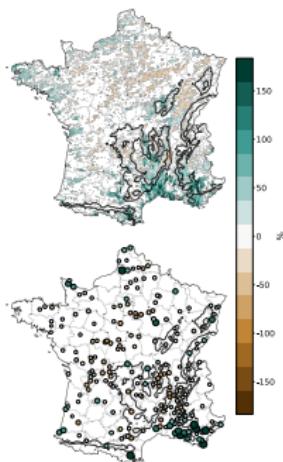


$r = 0.66$  ( $n = 51$ )  
 $ME = -56.07\%$

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



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



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

# 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%/ $^{\circ}\text{C}$  (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

# 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] 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. 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>
- [6] P. Molnar et al., « Relation of intense rainstorm properties to temperature », *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 19, p. 1753-1766, 2015.