

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

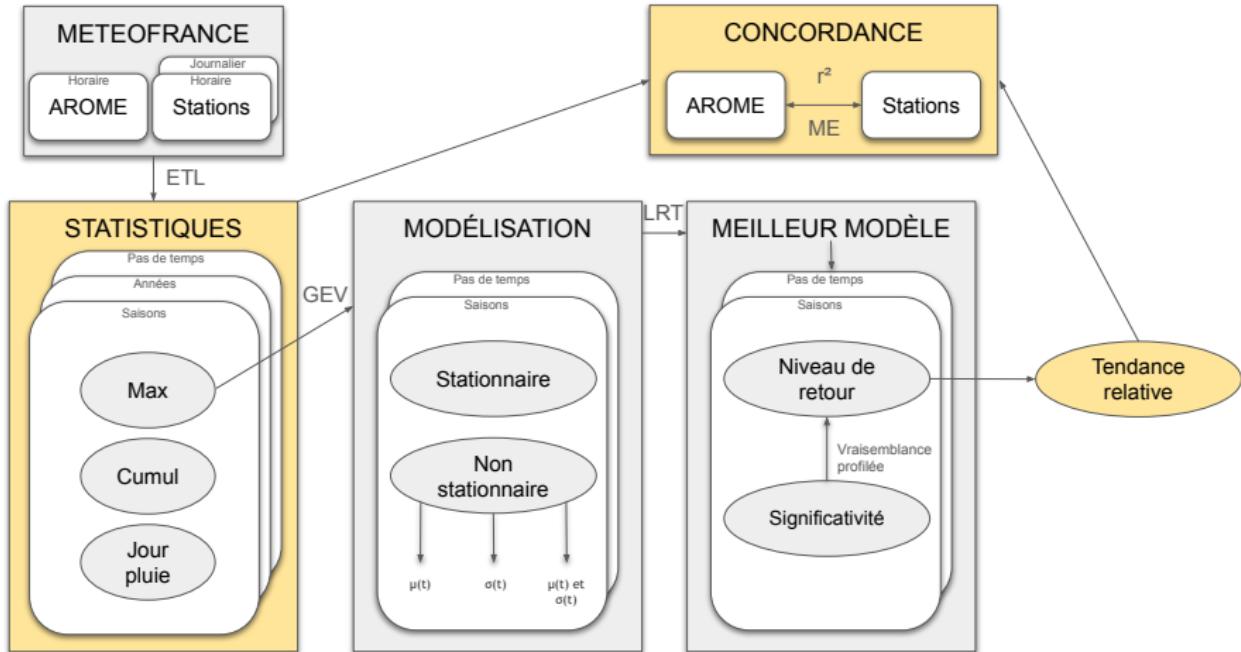
2. Validité des extrêmes simulés par ce modèle

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

- ℓ_s = log-vraisemblance du modèle stationnaire M_s
- ℓ_{ns} = log-vraisemblance du modèle non-stationnaire M_{ns}

Test du rapport de vraisemblance

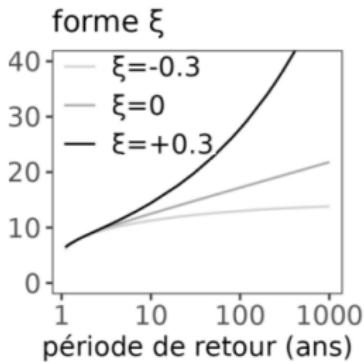
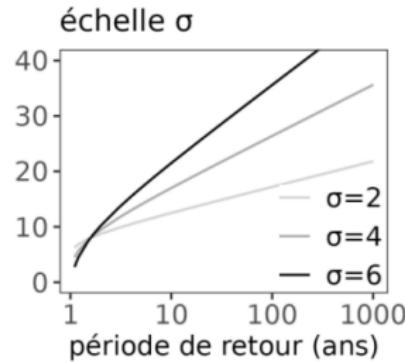
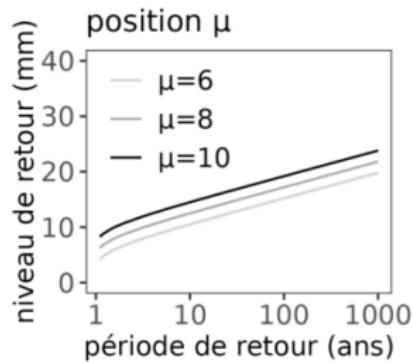
- ➊ $k = \dim(\theta_{ns}) - \dim(\theta_s)$
- ➋ $\Lambda = 2(\ell_{ns} - \ell_s)$
- ➌ H_0 (le modèle stationnaire suffit), Λ suit une loi du **chi-carré** avec k ddl
- ➍ $p = \mathbb{P}(\chi_k^2 \geq \Lambda)$

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

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

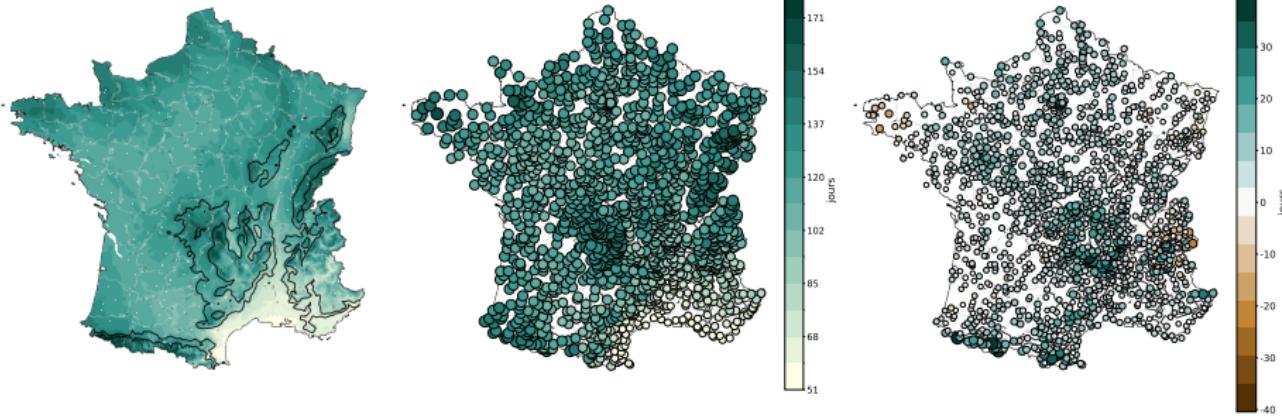


Avec

- $X \sim \text{GEV}(\mu, \sigma, \xi)$
- 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)



$$r = 0.95$$

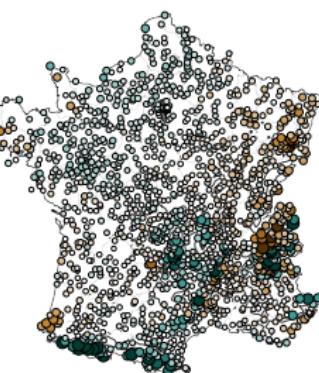
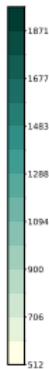
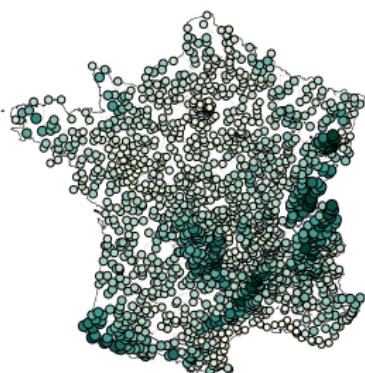
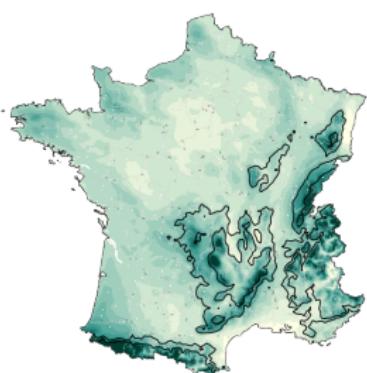
Δ (AROME - Stations) de 1959 à 2022 : +6.35 jours (+5.56%)

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



$$r = 0.94$$

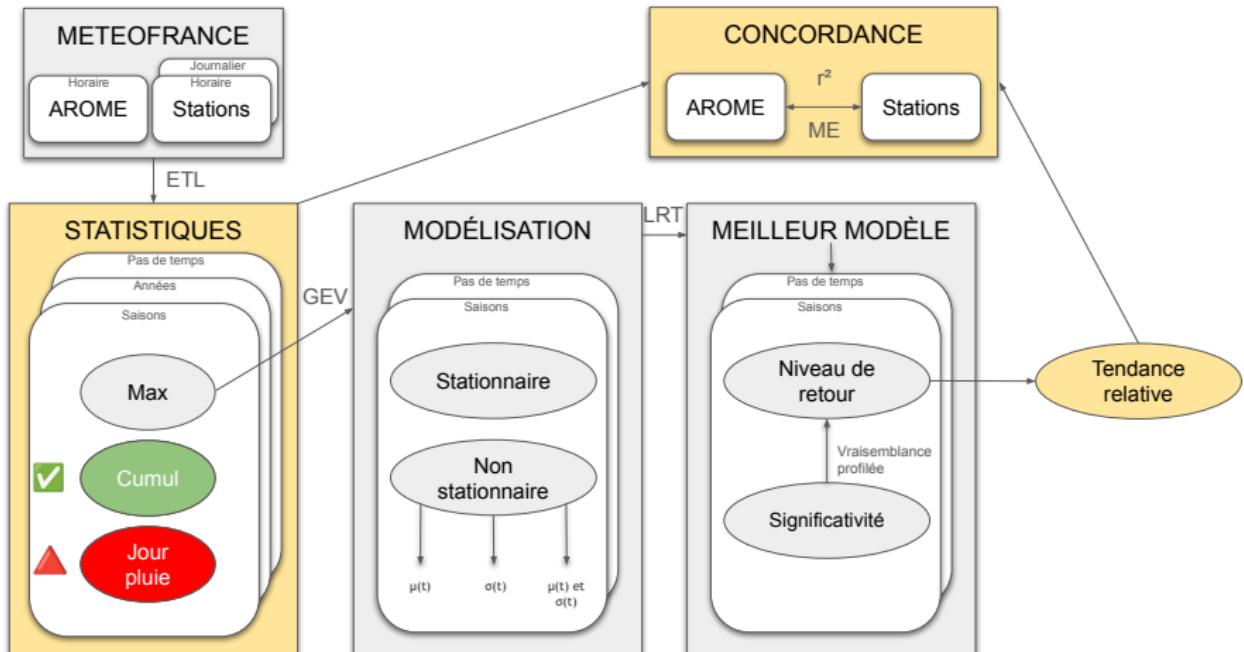
Δ (AROME - Stations) de 1959 à 2022 : +11.48 mm/an (+1.23%)

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

Répartition correcte de la quantité totale d'eau

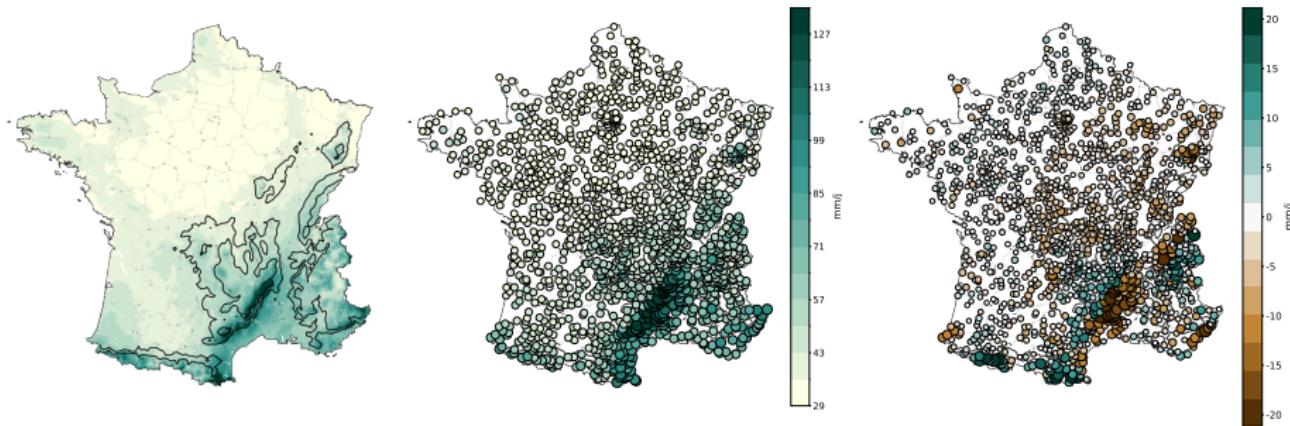
Résultats semblables à l'échelle horaire (1990-2022)

Pluies plus fréquentes en plus faibles quantités



Statistiques descriptives

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

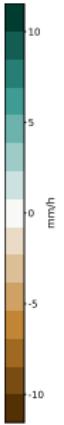
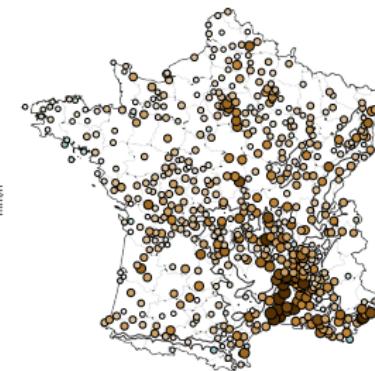
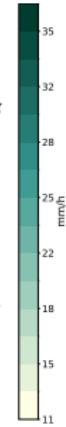
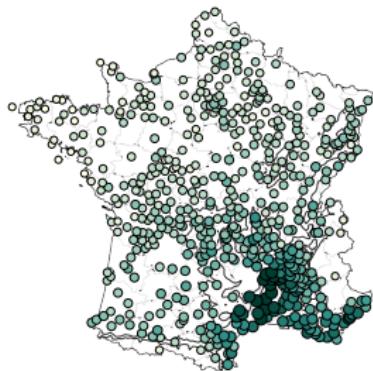


$$r = 0.96$$

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)



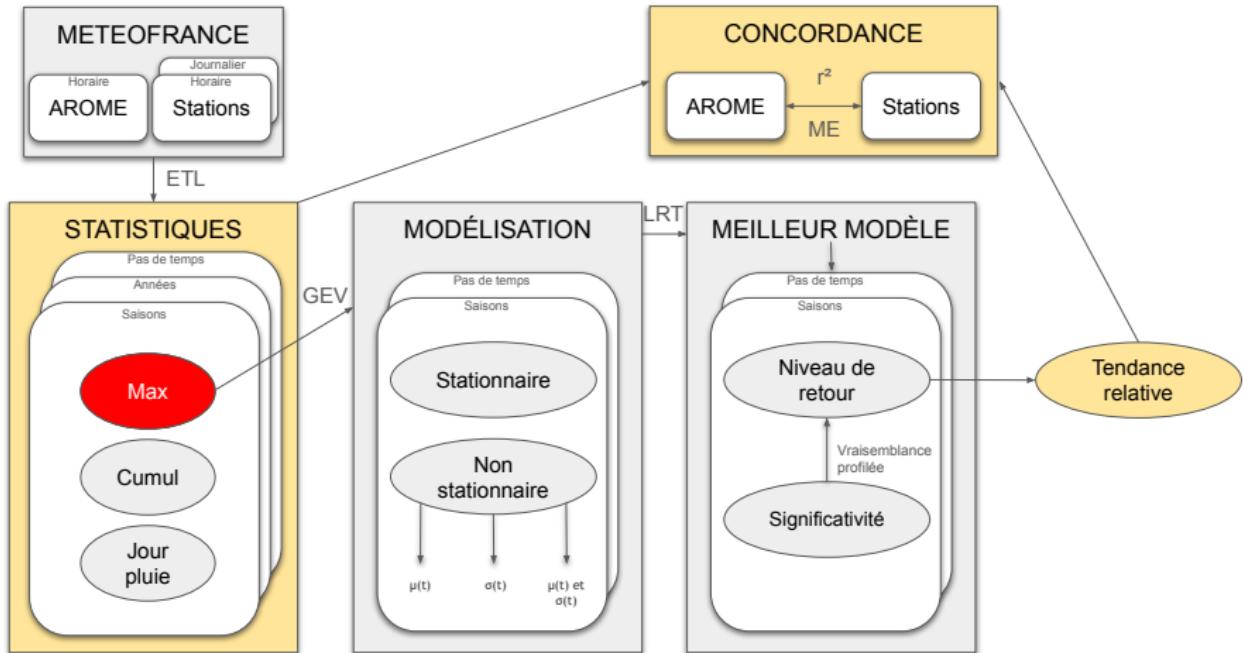
$$r = 0.89$$

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

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

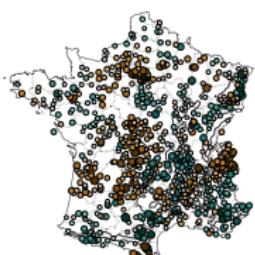
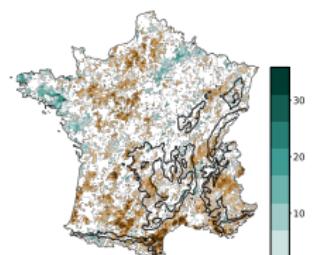
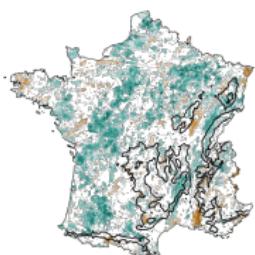
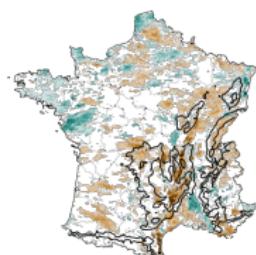
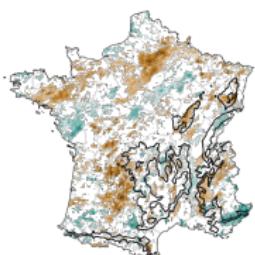
Tendances relatives de 1995 à 2022 du niveau de retour 10 ans

SON

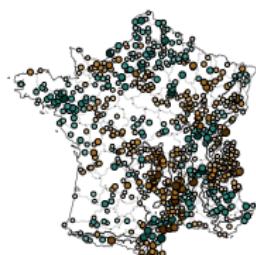
DJF

MAM

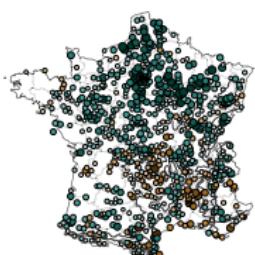
JJA



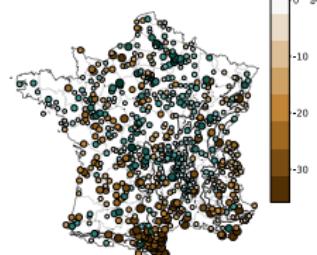
$r = 0.31$ ($n = 305$)
 $ME = -3.01\%$



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



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



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

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

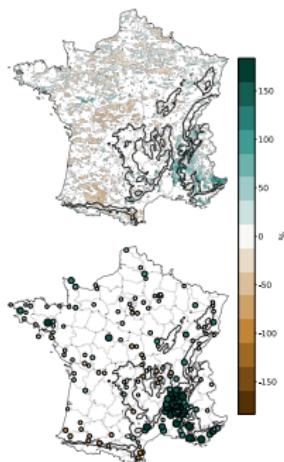
Tendances relatives de 1995 à 2022 du niveau de retour 10 ans

FEV

MAR

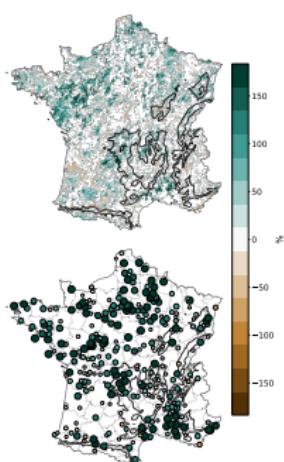
JUI

NOV

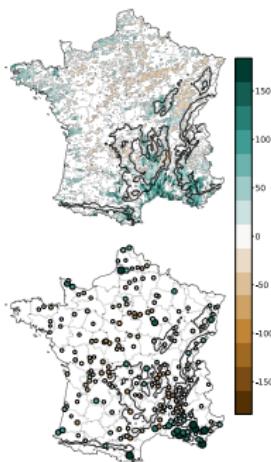


$r = 0.66$ ($n = 51$)
 $ME = -56.07\%$

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



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



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

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.