



Modélisation statistique des extrêmes de précipitation en contexte de changement climatique



Juliette BLANCHET
Institut des Géosciences de l'Environnement
Juliette.blanchet@univ-grenoble-alpes.fr



*GDR Défis Théoriques pour les Sciences du Climat
27-29 mai 2024, Grenoble*

■ LES EXTRÊMES MÉTÉOROLOGIQUES



- **Très rares** → on y est mal préparés, impacts
- **Extrêmes** = valeurs « inhabituellement » fortes ou faibles

■ LES EXTRÊMES MÉTÉOROLOGIQUES



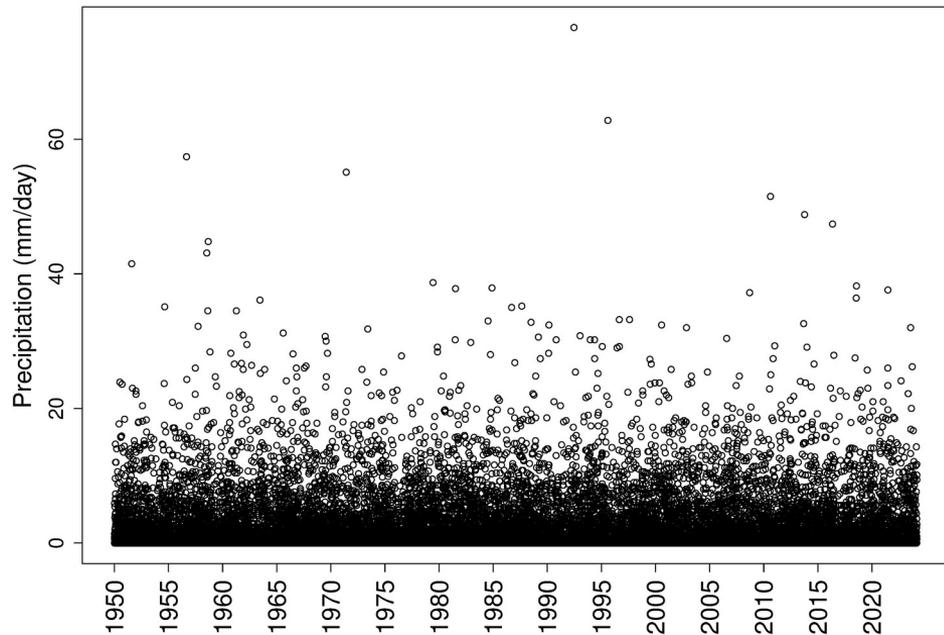
Extrêmes de précipitation

- **Très rares** → on y est mal préparés, impacts
- **Extrêmes** = valeurs « inhabituellement » fortes ou faibles



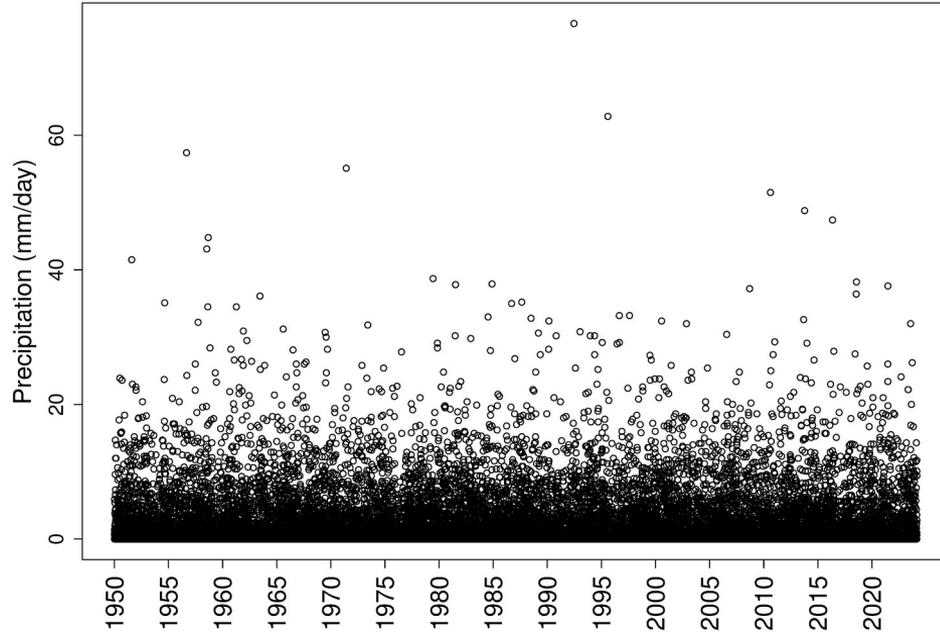
- **Très rares** → on y est mal préparés (au plus quelques fois dans une vie : périodes de retour de 20 ans, 100 ans, ...)
- **Extrêmes** = valeurs « inhabituellement » fortes ou faibles

■ QU'EST CE QU'UN EXTRÊME STATISTIQUE ?



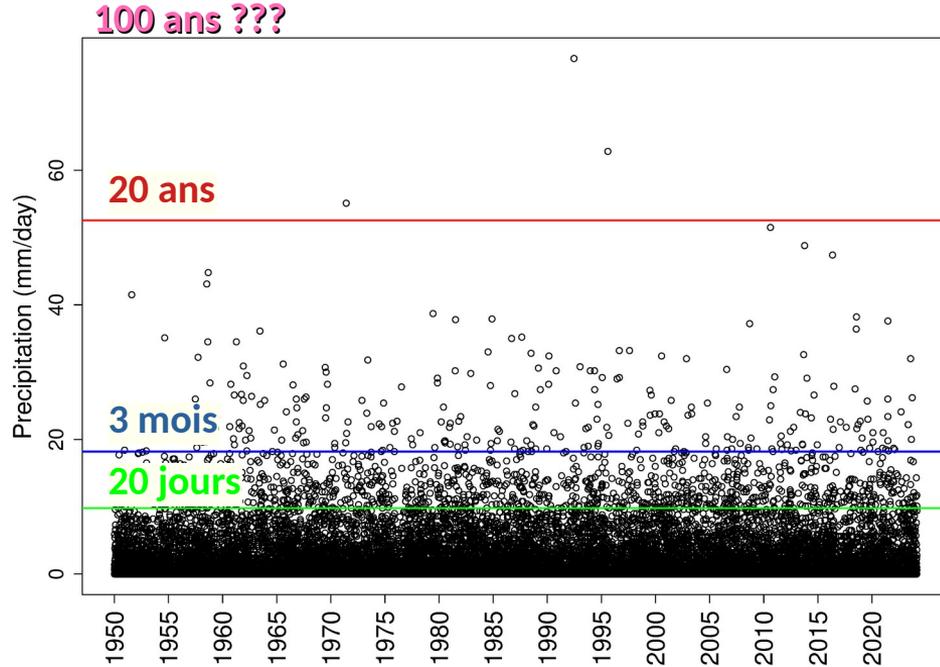
- Valeur « inhabituellement » forte (ou faible)
- Queue de la distribution statistique

■ QU'EST CE QU'UN EXTRÊME STATISTIQUE ?



- Valeur « inhabituellement » forte (ou faible)
- Queue de la distribution statistique
- Valeur que l'on dépasse au plus quelques fois dans une vie
- Par ex que l'on dépasse en moyenne une fois tous les 20, 100 ans, ... = **période de retour** 20 ans, 100 ans, ...

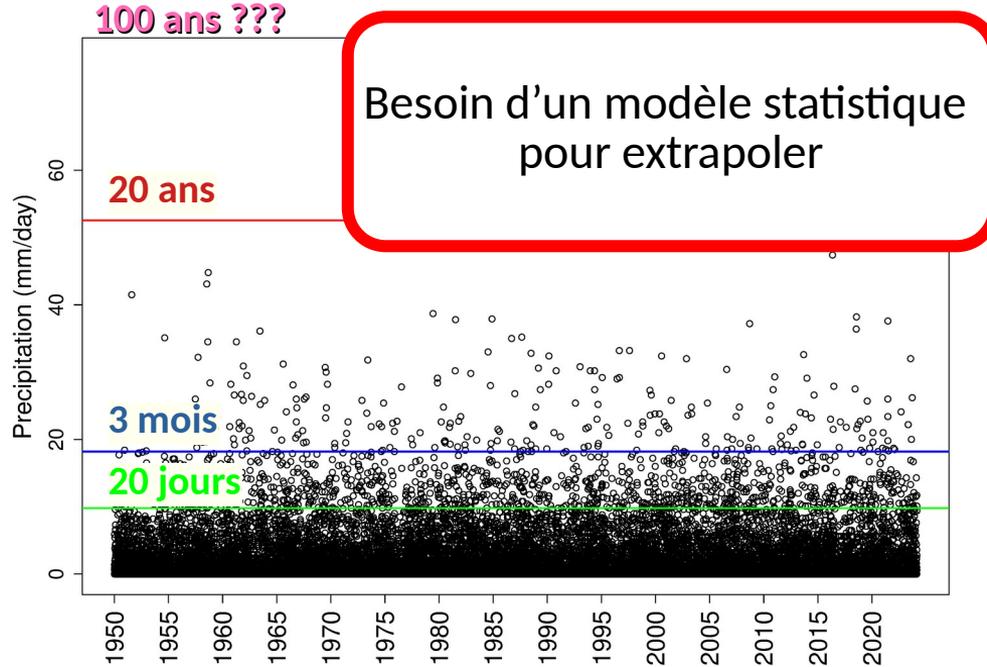
■ QU'EST CE QU'UN EXTRÊME STATISTIQUE ?



- Valeur « inhabituellement » forte (ou faible)
- Queue de la distribution statistique
- Valeur que l'on dépasse au plus quelques fois dans une vie
- Par ex que l'on dépasse en moyenne une fois tous les 20, 100 ans, ... = **période de retour** 20 ans, 100 ans, ...
- Pour une série journalière = que l'on dépasse en moyenne une fois tous les $365 \times N$ jours => **quantile $(1 - 1/(365 \times N))$**

- Période de retour 20 ans → quantile **0.999863** ; période de retour 100 ans → quantile **0.9999726**
- Bien au-delà des quantiles **0.95** ou même **0.99** parfois considérés en climat (période de retour 20j, 3 mois)

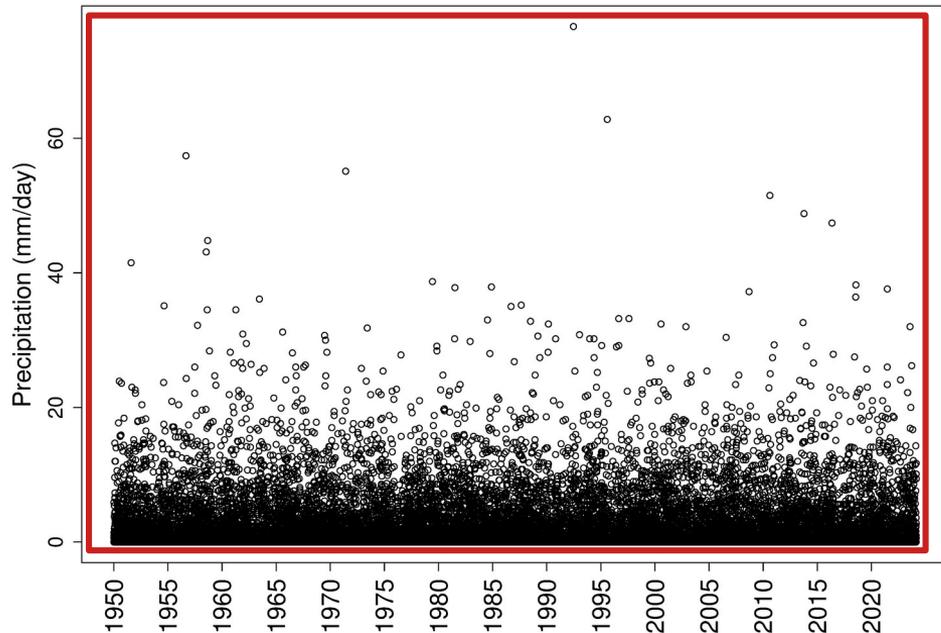
■ QU'EST CE QU'UN EXTRÊME STATISTIQUE ?



- Valeur « inhabituellement » forte (ou faible)
- Queue de la distribution statistique
- Valeur que l'on dépasse au plus quelques fois dans une vie
- Par ex que l'on dépasse en moyenne une fois tous les 20, 100 ans, ... = **période de retour** 20 ans, 100 ans, ...
- Pour une série journalière = que l'on dépasse en moyenne une fois tous les $365 \times N$ jours => **quantile $(1 - 1/(365 \times N))$**

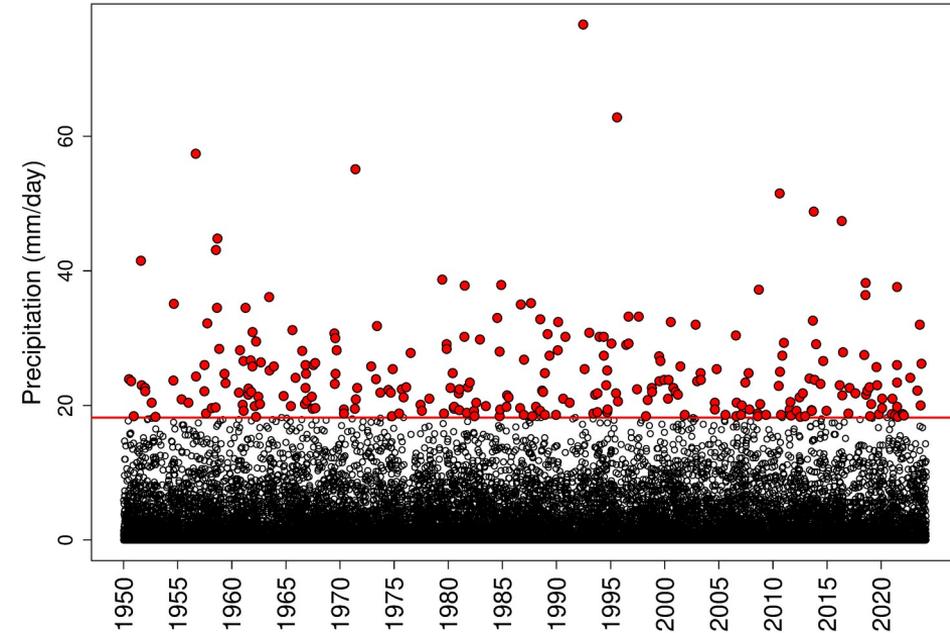
- Période de retour 20 ans → quantile **0.999863** ; période de retour 100 ans → quantile **0.9999726**
- Bien au-delà des quantiles **0.95** ou même **0.99** parfois considérés en climat (période de retour 20j, 3 mois)

■ MODÉLISATION STATISTIQUE DES EXTRÊMES

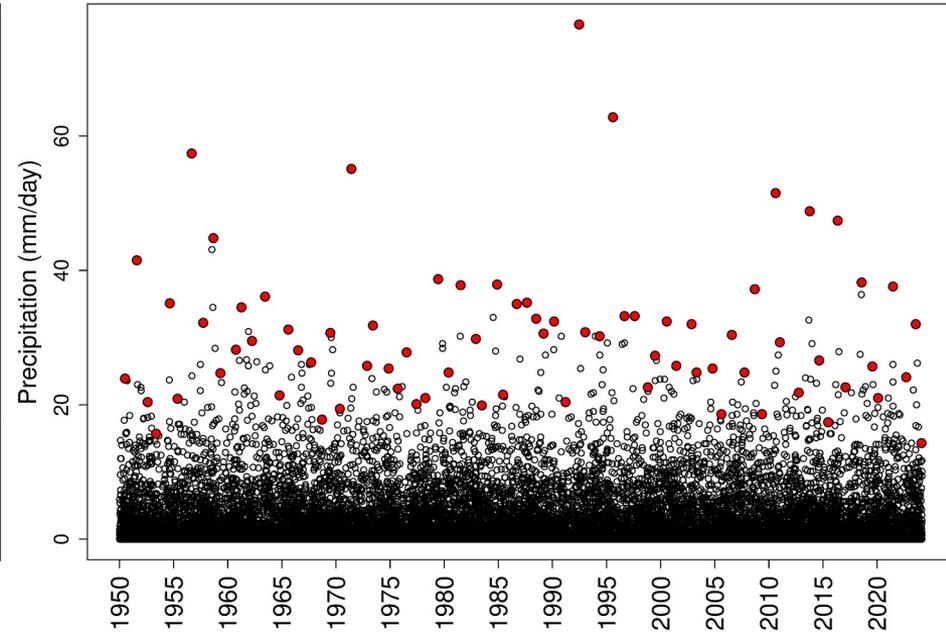


- Utiliser toute la distribution → compliqué de bien modéliser la queue.
- Par ex loi Gamma → décroissance exponentielle, « queue légère », => risque de sous-estimer la fréquence des extrêmes.
- Néanmoins EGPD de *Naveau et al. 2016*.

■ MODÉLISATION STATISTIQUE DES EXTRÊMES



Excès de seuil, « peaks over threshold » (ici $q_{0.95}$)



Maxima annuels

Théoriquement équivalents (seuil $\rightarrow \infty$, taille du bloc = ∞)

Choix de la distribution = on peut se reposer sur la théorie des valeurs extrêmes

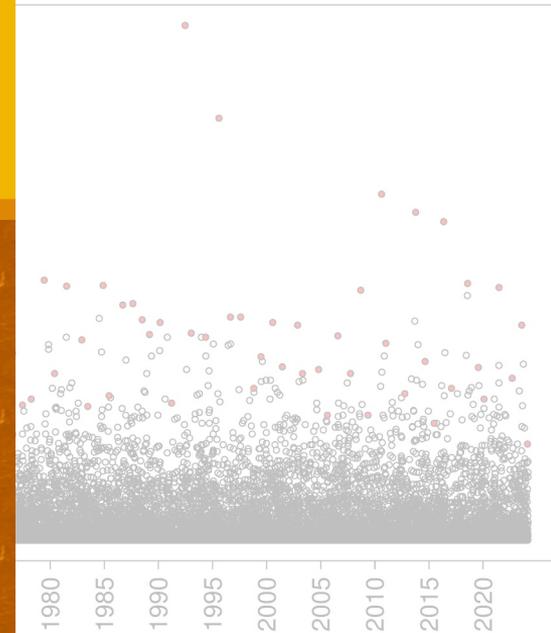
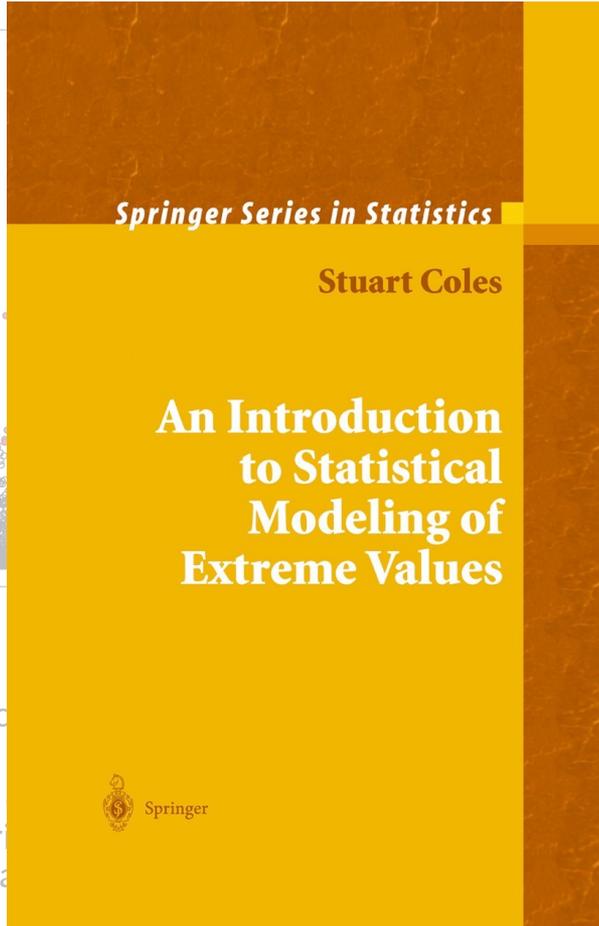
Dans le reste : cas des maxima annuels (plus facile à identifier en contexte non-stationnaire)

■ MODÉLISATION STATISTIQUE DES EXTRÊMES



Excès de seuil, « peaks over threshold » (ic

Théoriquement
Choix de la distr
Dans le reste : ca



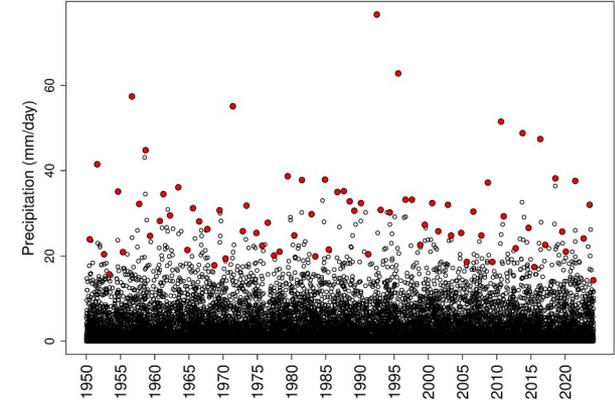
Maxima annuels

)
ie des valeurs extrêmes
ier en contexte non-stationnaire)

■ THÉORIE STATISTIQUE DES EXTRÊMES

$$M_n = \max\{X_1, \dots, X_n\}$$

where X_1, \dots, X_n , is a sequence of independent random variables



■ THÉORIE STATISTIQUE DES EXTRÊMES

$$M_n = \max\{X_1, \dots, X_n\}$$

where X_1, \dots, X_n , is a sequence of independent random variables

Theorem 3.1.1 If there exist sequences of constants $\{a_n > 0\}$ and $\{b_n\}$ such that

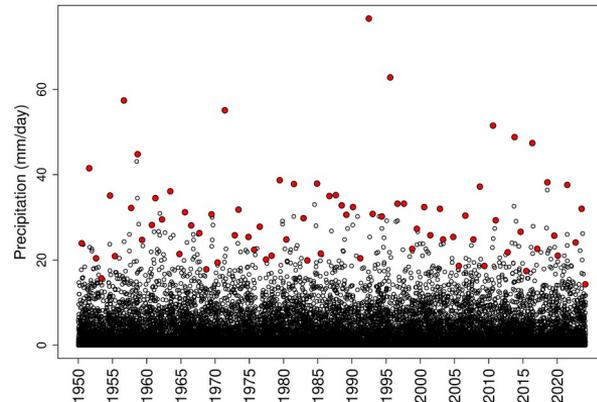
$$\Pr\{(M_n - b_n)/a_n \leq z\} \rightarrow G(z) \quad \text{as } n \rightarrow \infty \quad (3.3)$$

for a non-degenerate distribution function G , then G is a member of the GEV family

$$G(z) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{z - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\},$$

Distribution GEV « Generalized Extreme Value »

defined on $\{z : 1 + \xi(z - \mu)/\sigma > 0\}$, where $-\infty < \mu < \infty$, $\sigma > 0$ and $-\infty < \xi < \infty$. \square



■ THÉORIE STATISTIQUE DES EXTRÊMES

$$M_n = \max\{X_1, \dots, X_n\}$$

where X_1, \dots, X_n , is a sequence of independent random variables

Theorem 3.1.1 If there exist sequences of constants $\{a_n > 0\}$ and $\{b_n\}$ such that

$$\Pr\{(M_n - b_n)/a_n \leq z\} \rightarrow G(z) \quad \text{as } n \rightarrow \infty \quad (3.3)$$

for a non-degenerate distribution function G , then G is a member of the GEV family

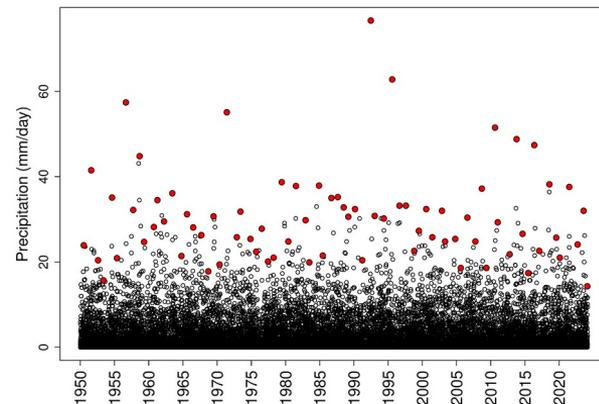
$$G(z) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{z - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\}, \quad \text{Distribution GEV « Generalized Extreme Value »}$$

defined on $\{z : 1 + \xi(z - \mu)/\sigma > 0\}$, where $-\infty < \mu < \infty$, $\sigma > 0$ and $-\infty < \xi < \infty$. \square

$$\begin{aligned} \text{De manière équivalente, si } n \text{ assez grand, } \Pr\{M_n \leq z\} &\approx G\{(z - b_n)/a_n\} \\ &= G^*(z), \end{aligned}$$

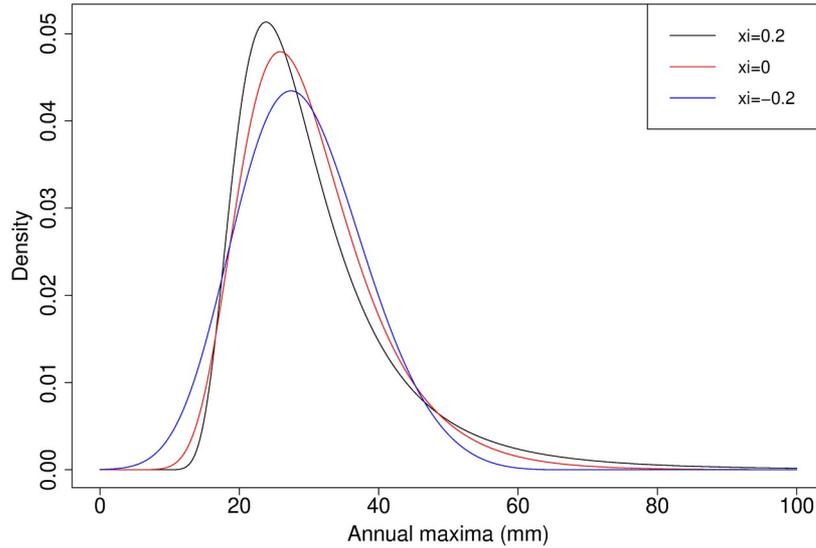
où G^* est une distribution GEV (paramètres à estimer)

→ on connaît la distribution théorique des max : la GEV ! (sous hypothèses...)



■ DISTRIBUTION GEV ET PÉRIODE DE RETOUR

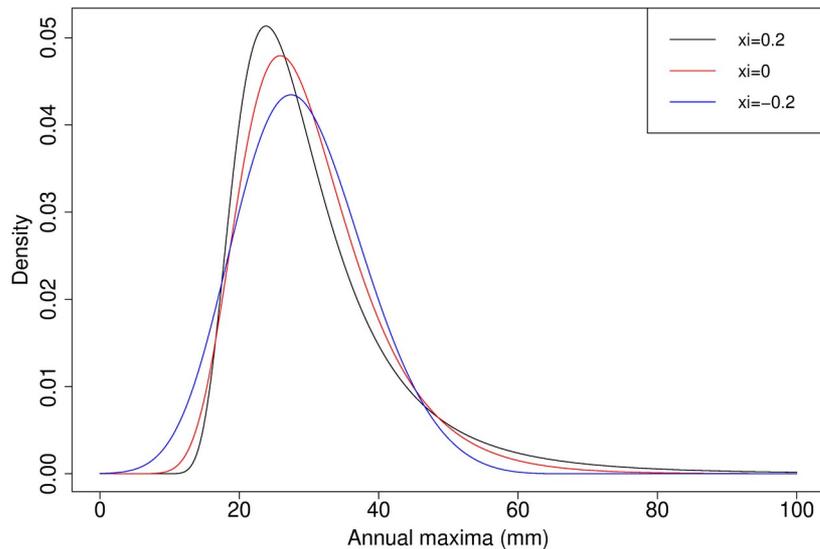
$$G(z) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{z - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\}$$



→ Une distribution flexible

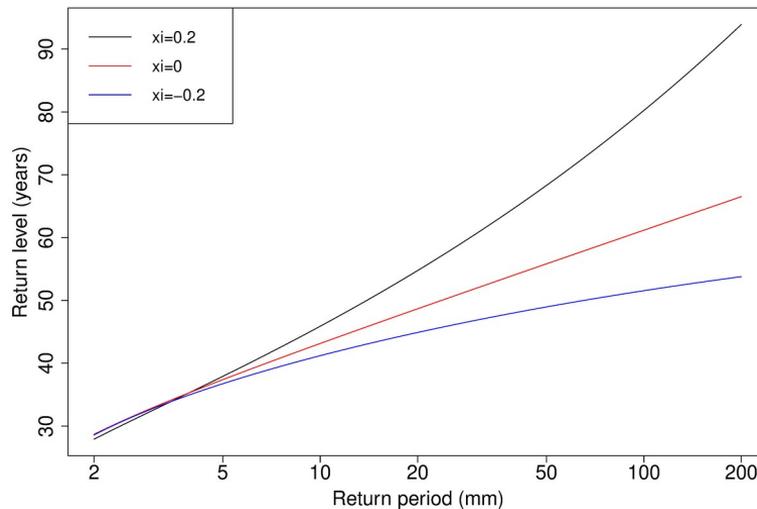
■ DISTRIBUTION GEV ET PÉRIODE DE RETOUR

$$G(z) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{z - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\}$$

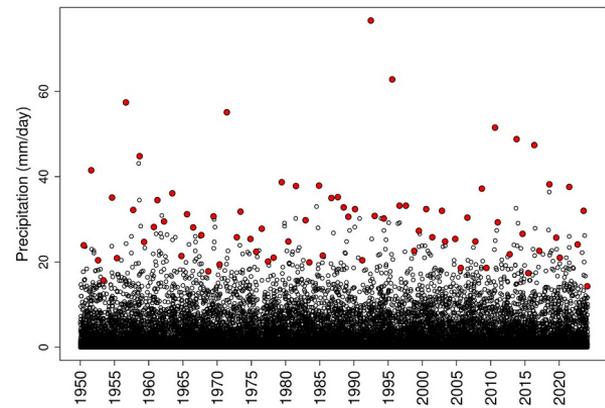
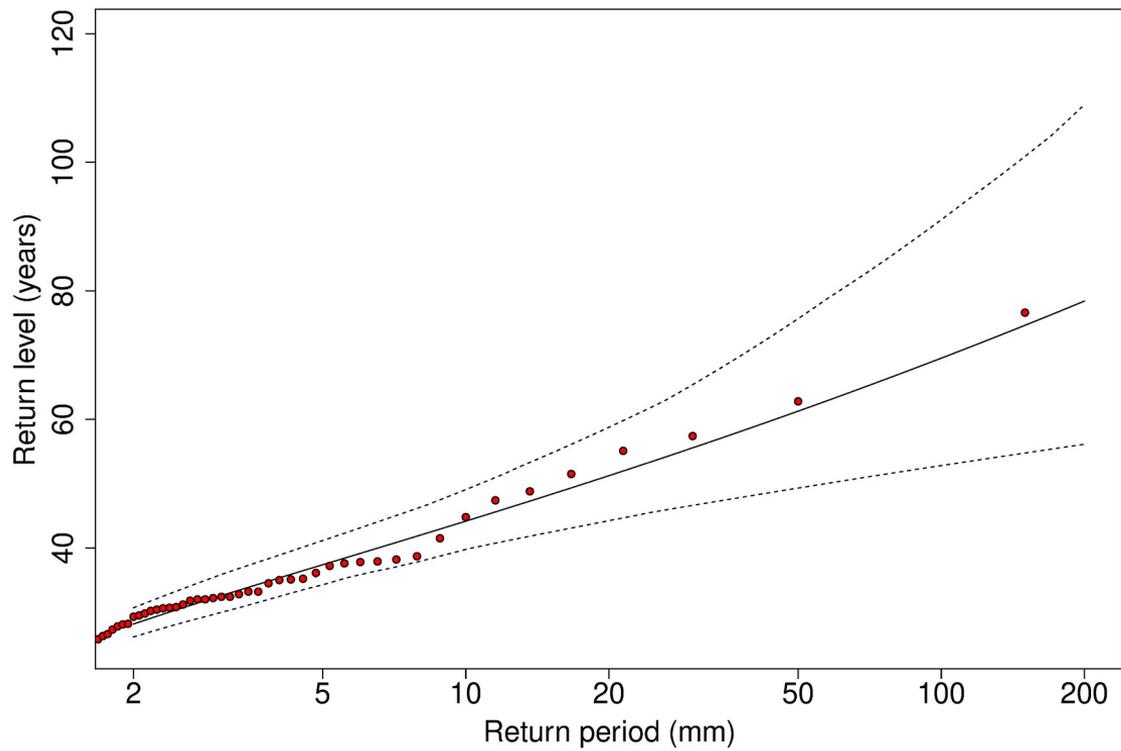


→ Une distribution flexible
(queue lourde, légère, bornée)

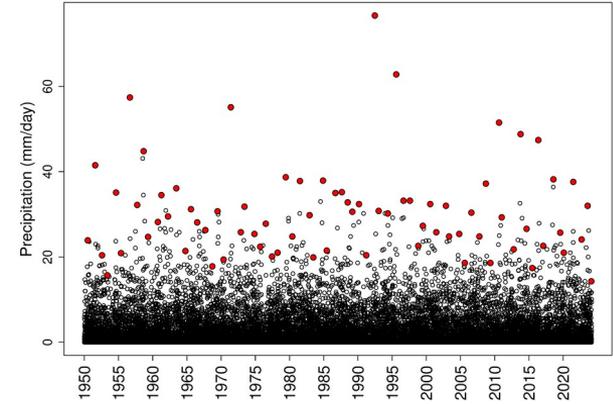
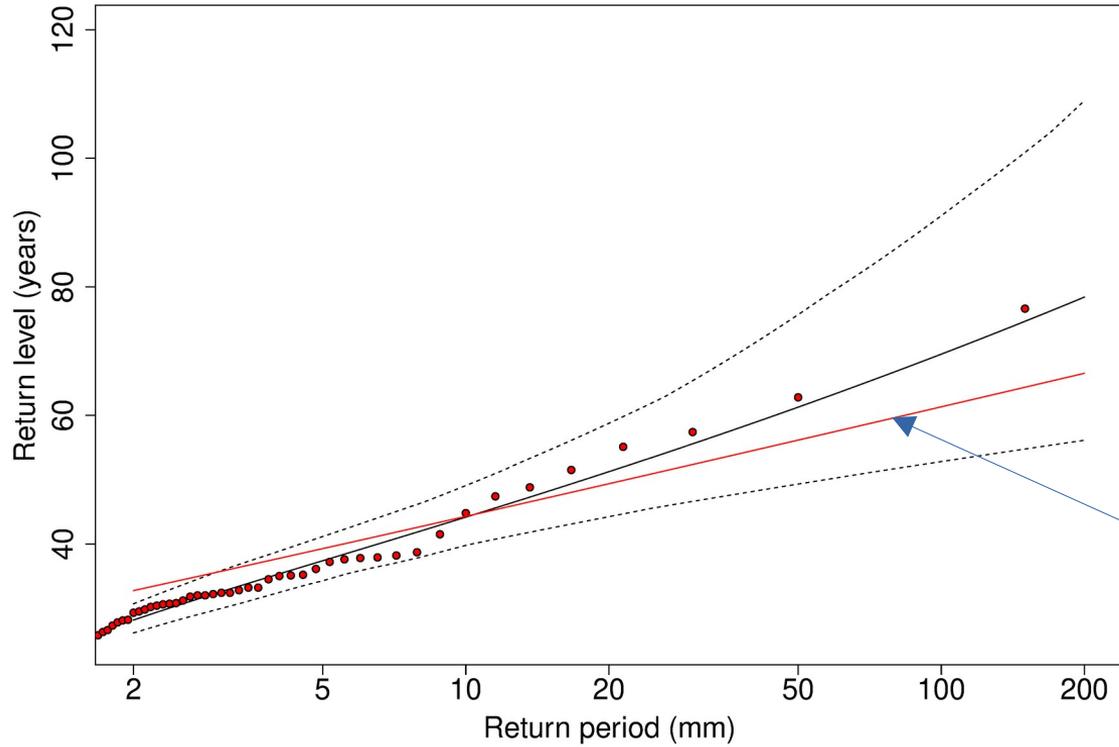
Niveau de retour associé à la période de retour $1/p$: $\mu - \frac{\sigma}{\xi} \left[1 - \{-\log(1-p)\}^{-\xi} \right]$



■ SUR LES DONNÉES

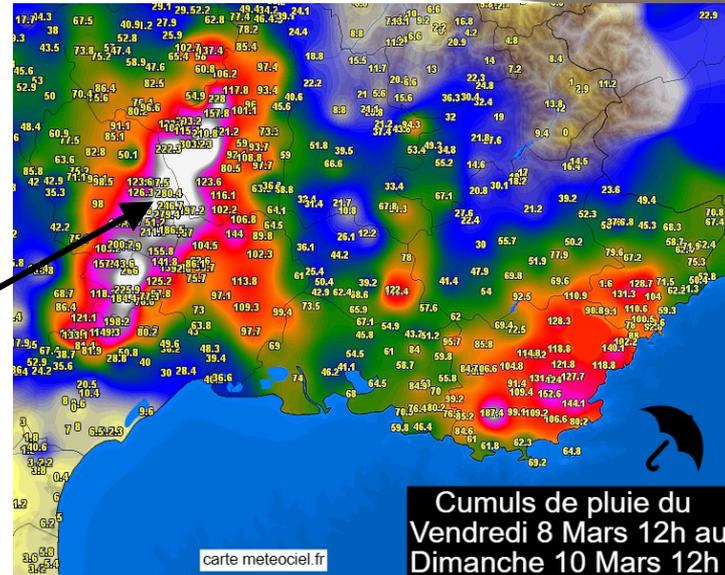
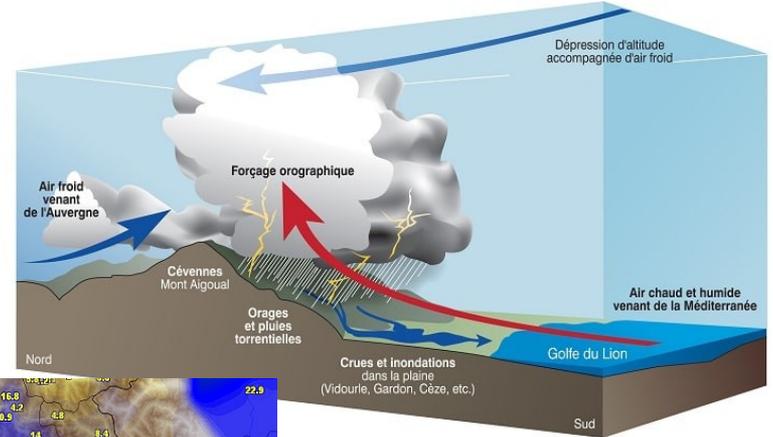


■ SUR LES DONNÉES



Distribution Gamma estimée
sur toutes les données =
sous-estime la récurrence des
extrêmes
(Gamma : 60mm=100 ans,
GEV : 60mm=50 ans)

LES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES EN CÉVENNES-VIVARAIS

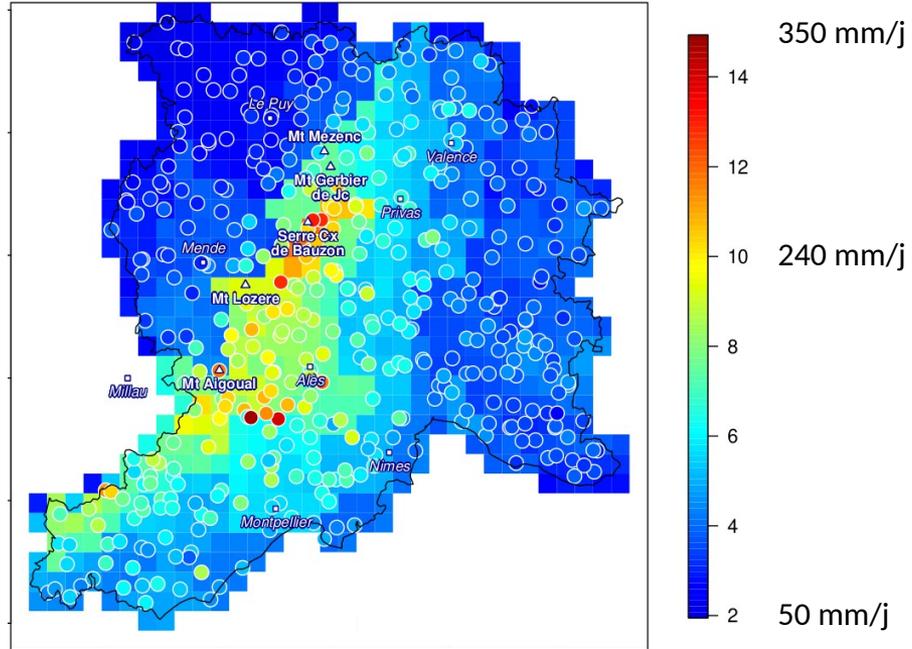


Plus de 200 mm en 24h (record FR : 1000 mm en octobre 1940 dans le Roussillon)

LES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES EN CÉVENNES-VIVARAIS



Niveau de retour 20 ans (mm/h) (à partir d'une GEV)

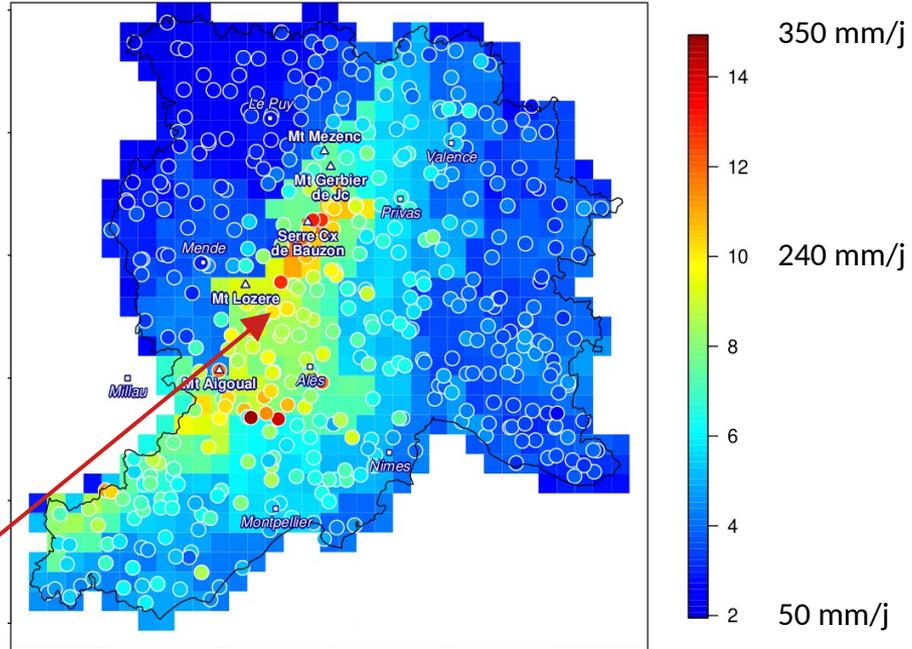


Blanchet et al. 2018

LES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES EN CÉVENNES-VIVARAIS

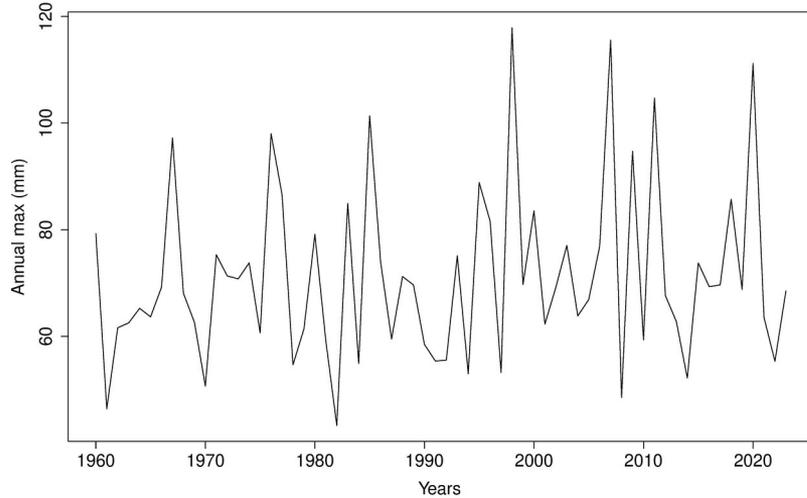


Niveau de retour 20 ans (mm/h) (à partir d'une GEV)



Concentration des extrêmes journaliers
sur la crête

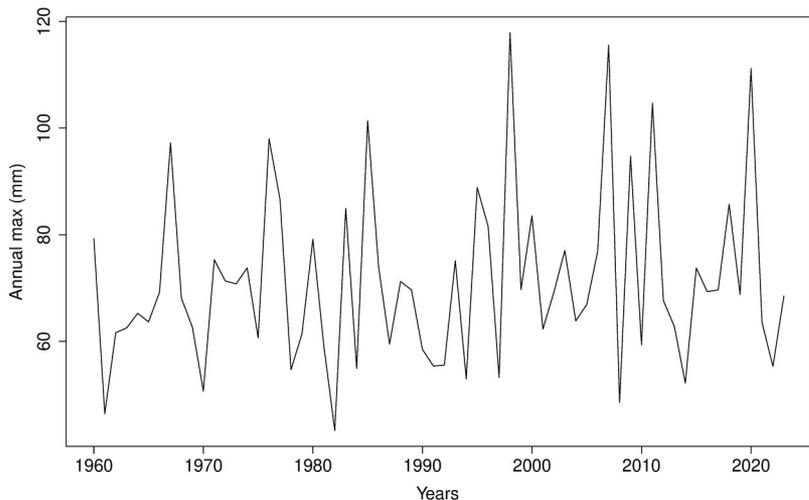
Blanchet et al. 2018



Évolution des précipitations extrêmes ?

Par ex. du niveau de retour 20 ans

→ Modèle statistique indispensable (extrapolation)

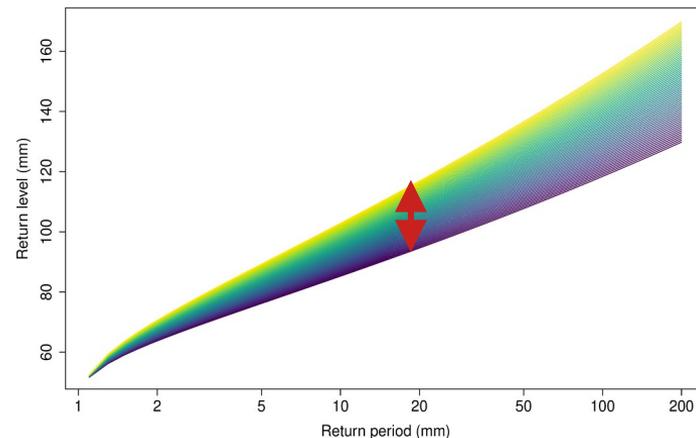
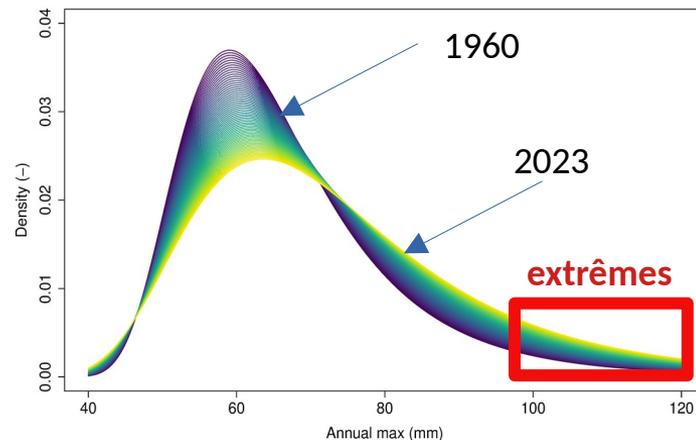


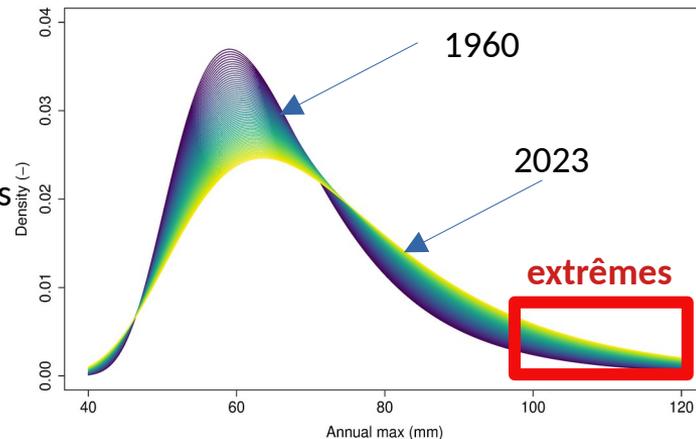
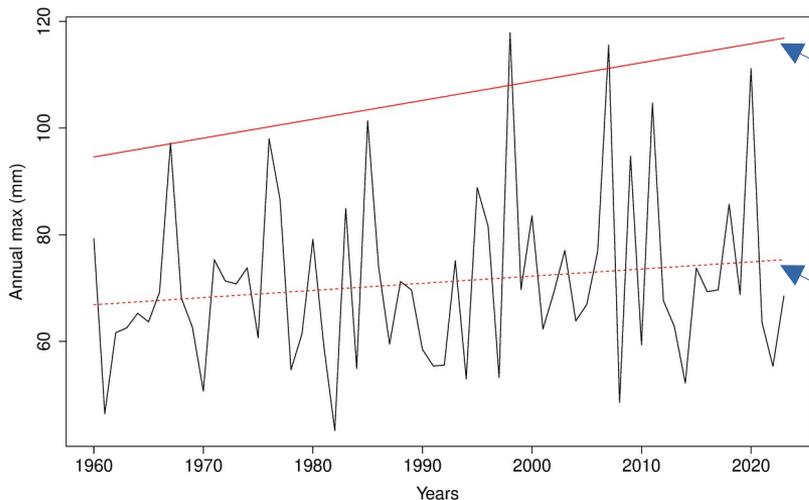
Évolution des précipitations extrêmes ?

Par ex. du niveau de retour 20 ans

→ Modèle statistique indispensable (extrapolation)

→ **GEV dont les paramètres évoluent avec le temps**



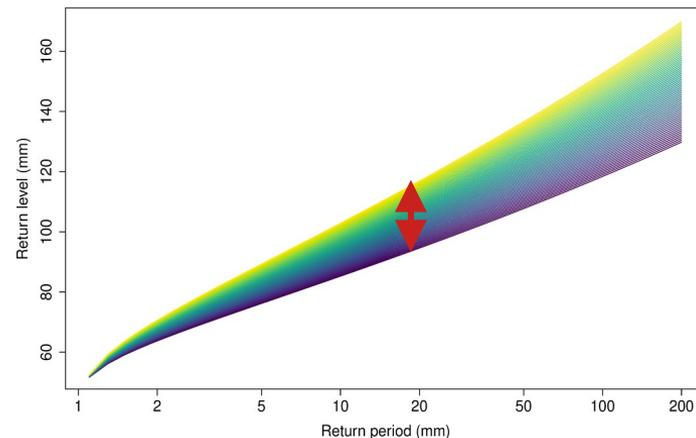


Évolution des précipitations extrêmes ?

Par ex. du niveau de retour 20 ans

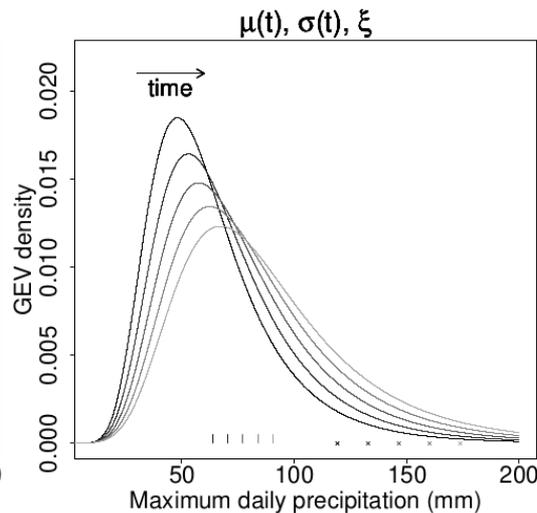
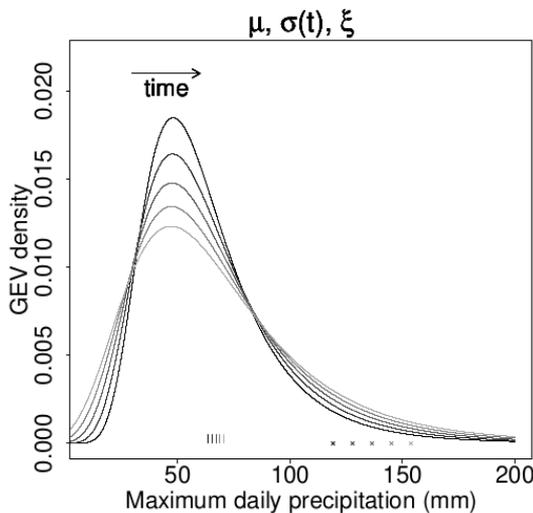
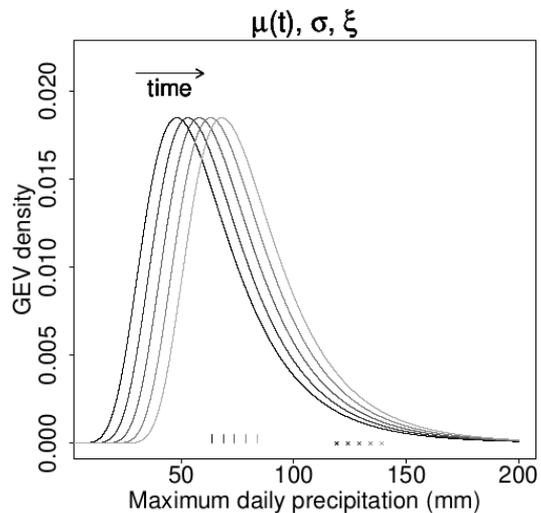
→ Modèle statistique indispensable (extrapolation)

→ **GEV dont les paramètres évoluent avec le temps**



$$G(z) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{z - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\}$$

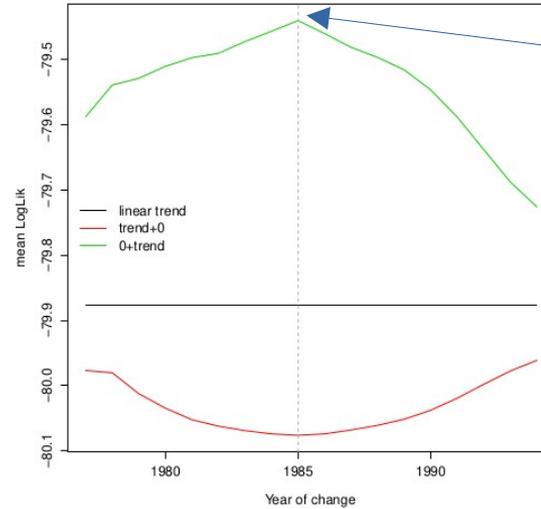
Model	$\mu(t); \sigma(t)$	ξ constant	nb. param.	
M_0	$\mu_0; \sigma_0$		3	} Linéaire
M_μ	$\mu_0 + \mu_1 t; \sigma_0$		4	
M_σ	$\mu_0; \sigma_0 + \sigma_1 t$		4	
$M_{\mu,\sigma}$	$\mu_0 + \mu_1 t; \sigma_0 + \sigma_1 t$		5	} Linéaire avec point de rupture
M'_μ	μ_0 if $t \leq t_0$, $\mu_0 + \mu_1 t$ otherwise; σ_0		4	
M'_σ	$\mu_0; \sigma_0$ if $t \leq t_0$, $\sigma_0 + \sigma_1 t$ otherwise		4	
$M'_{\mu,\sigma}$	μ_0 if $t \leq t_0$, $\mu_0 + \mu_1 t$ otherwise; σ_0 if $t \leq t_0$, $\sigma_0 + \sigma_1 t$ otherwise		5	



LES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES EN CÉVENNES-VIVARAIS



Blanchet et al. 2018



À l'échelle régionale, modèle linéaire avec point de rupture en 1985 le plus vraisemblable

début t0 fin



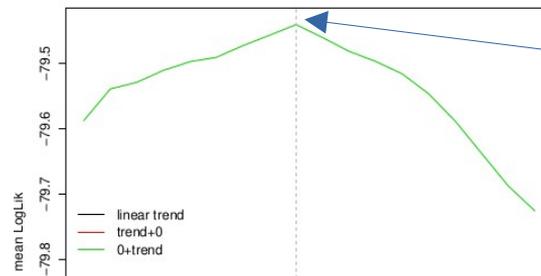
LES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES EN CÉVENNES-VIVARAIS



© Jean-Benoît Bouron, 2005 / <http://cartothèque.free.fr>

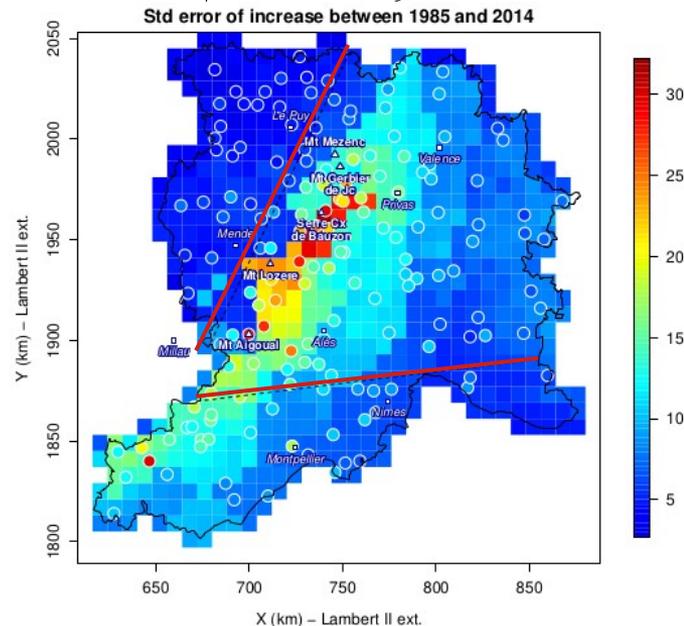
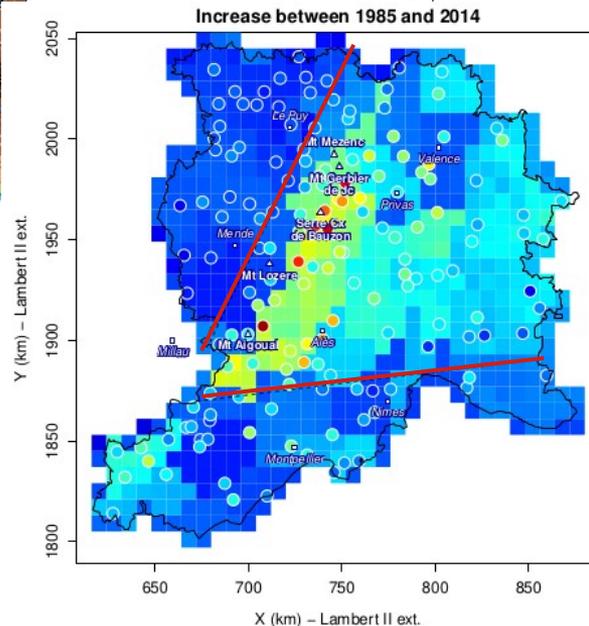
Blanchet et al. 2018

Données : SAFRAN+stations



À l'échelle régionale, modèle linéaire avec point de rupture en 1985 le plus vraisemblable

début t0 fin

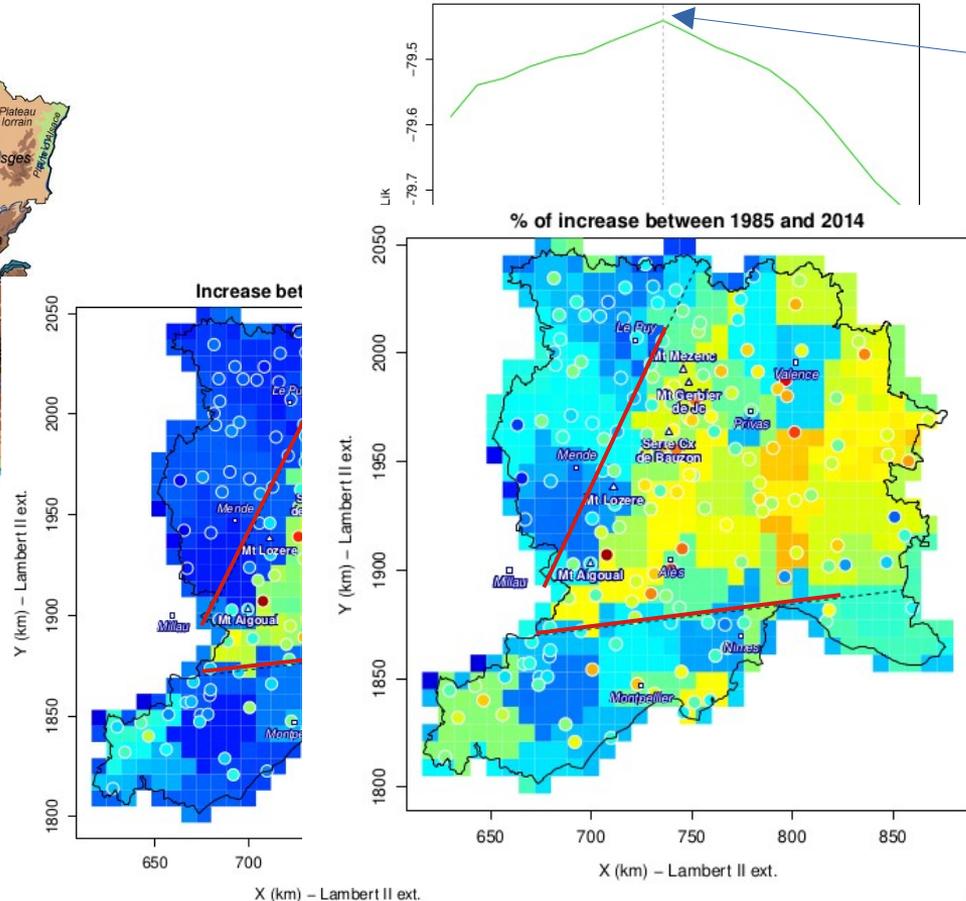


LES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES EN CÉVENNES-VIVARAIS



Blanchet et al. 2018

Données : SAFRAN+stations



À l'échelle régionale, modèle linéaire avec point de rupture en 1985 le plus vraisemblable

début t₀ fin

X (km) – Lambert II ext.

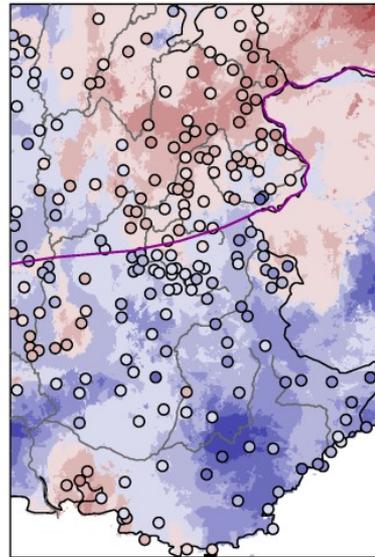
LES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES DANS LES ALPES



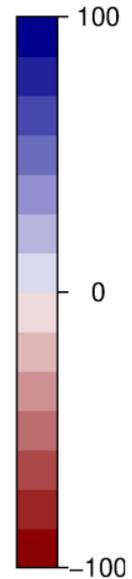
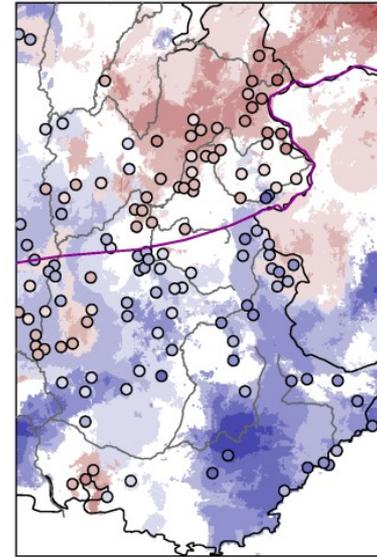
Blanchet et al. 2021a

Données : SPAZM+stations

% d'augmentation 1958-2017



Significatifs seulement



→ clair dipôle Alpes du Nord-Alpes du Sud

→ Y a-t-il une évolution des extrêmes ?
= **Détection**

→ Y a-t-il une évolution des extrêmes ?

= **Détection**

→ Quelles sont les changements du climat qui expliquent cette tendance ?

= « **Attribution statistique** » ≠ **Attribution événementielle**

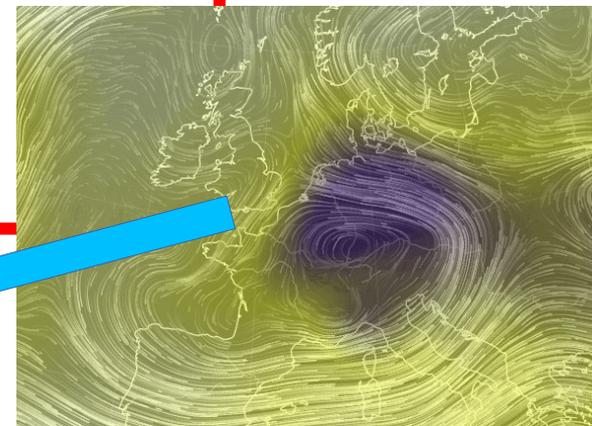
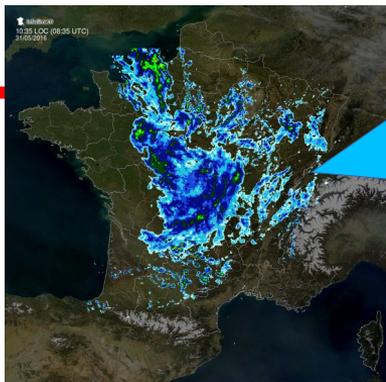
→ Y a-t-il une évolution des extrêmes ?

= **Détection**

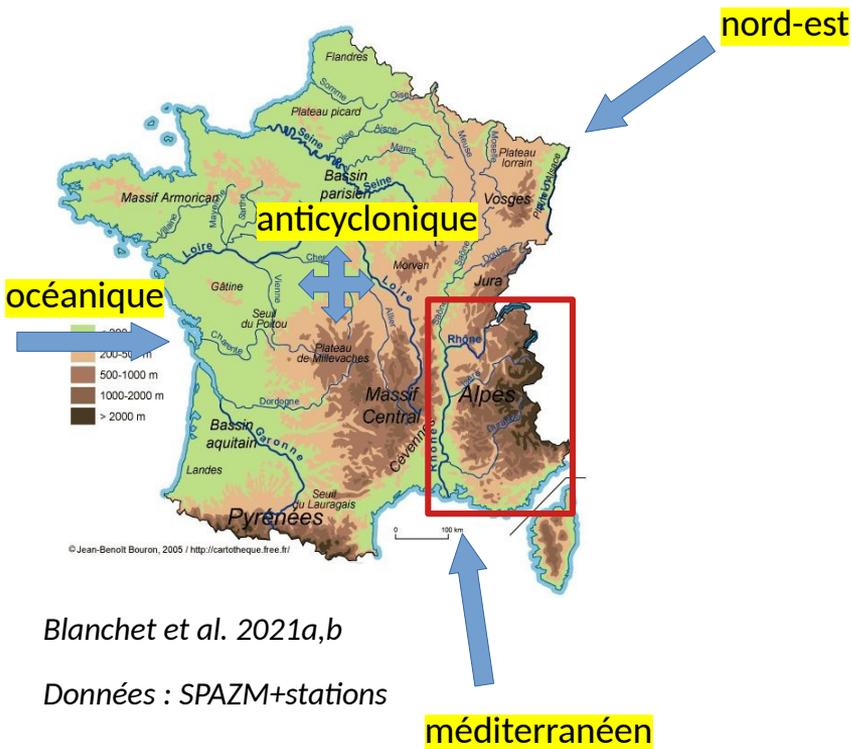
→ Quelles sont les changements du climat qui expliquent cette tendance ?

= « **Attribution statistique** » ≠ **Attribution événementielle**

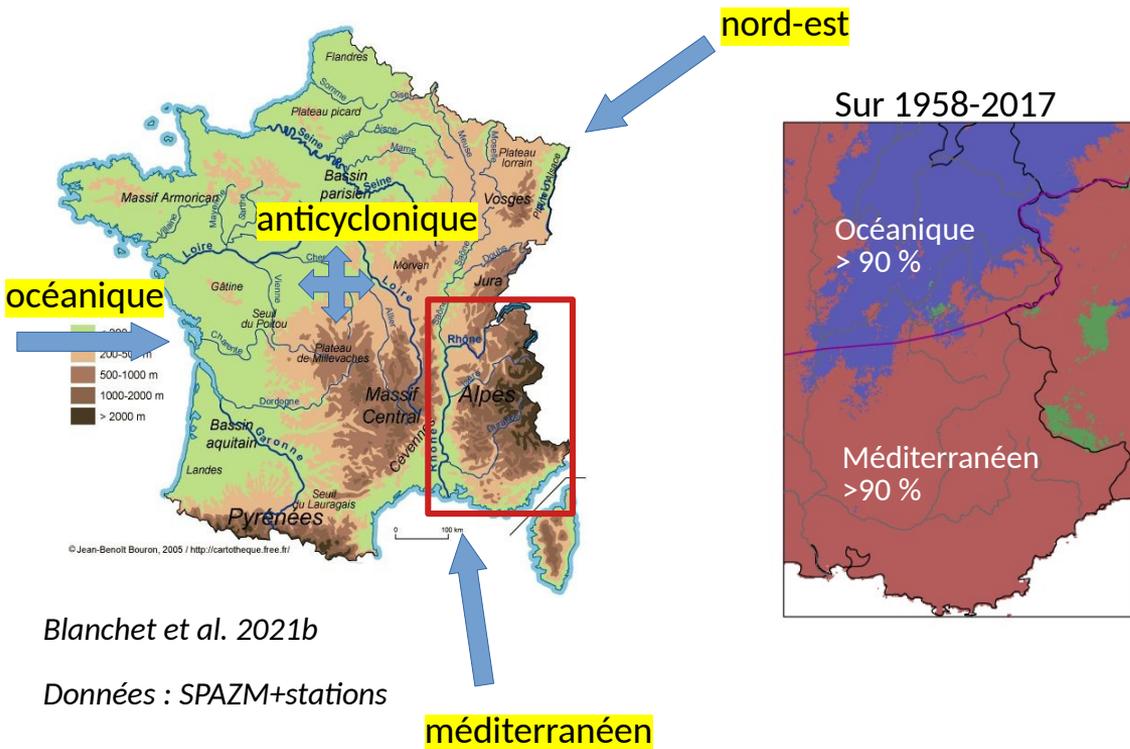
Nécessite de comprendre en amont les **mécanismes** climatiques qui génèrent des extrêmes (circulations)



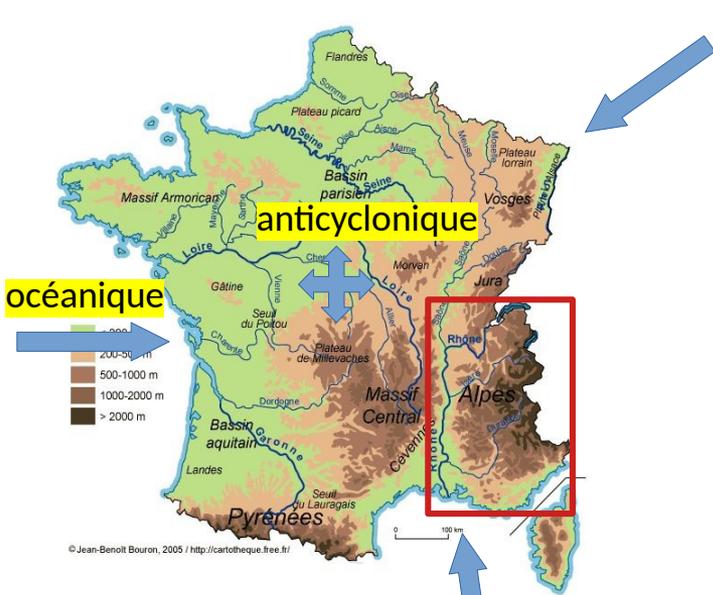
■ CIRCULATIONS ET PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES DANS LES ALPES



■ CIRCULATIONS ET PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES DANS LES ALPES



■ CIRCULATIONS ET PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES DANS LES ALPES

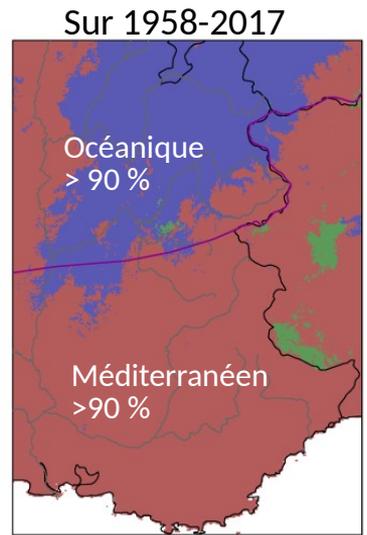


nord-est

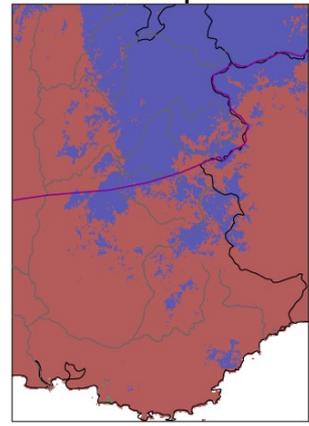
océanique

anticyclonique

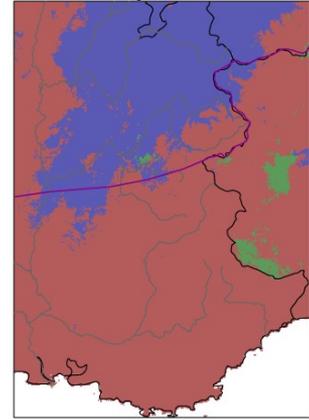
méditerranéen



Début de période



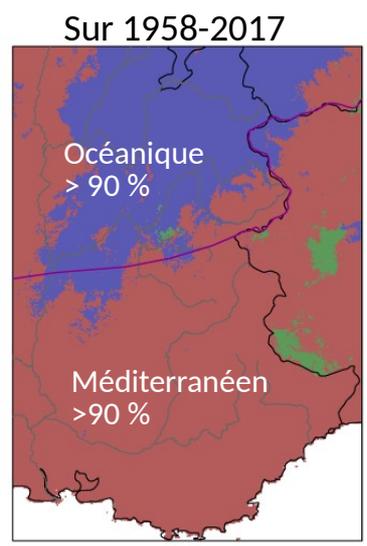
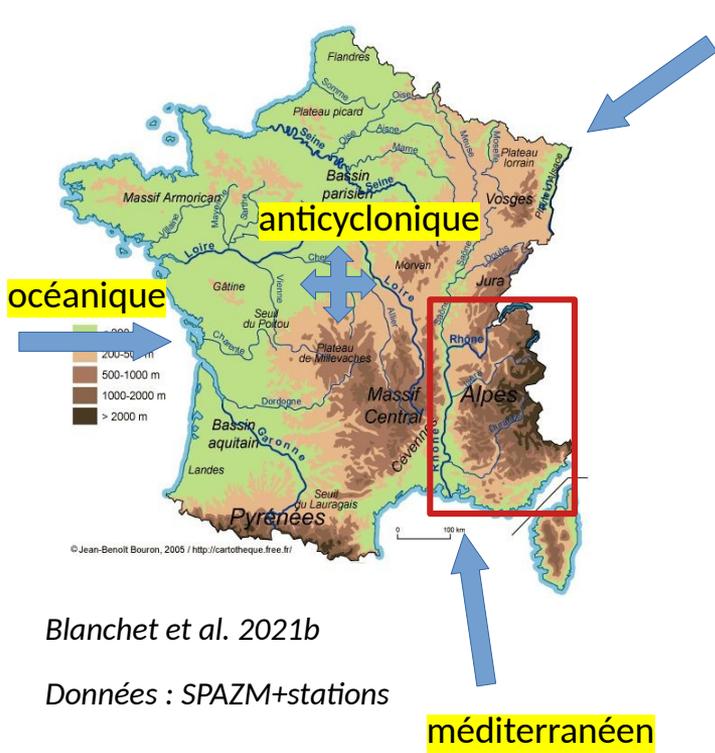
Fin de période



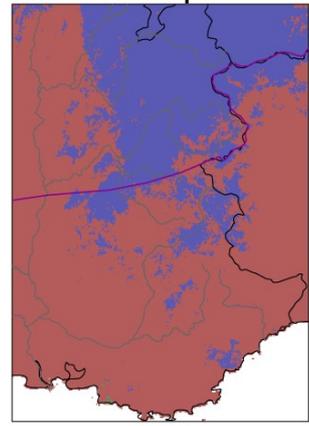
Blanchet et al. 2021b

Données : SPAZM+stations

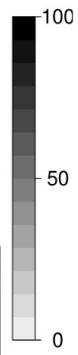
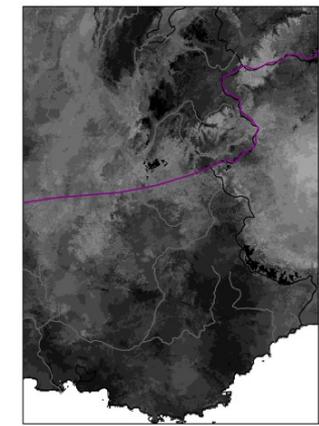
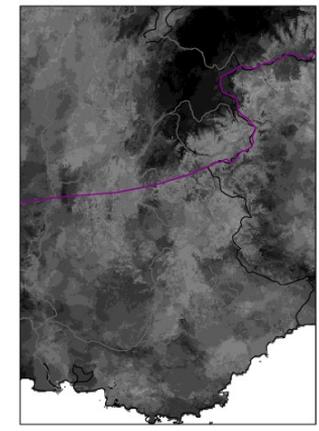
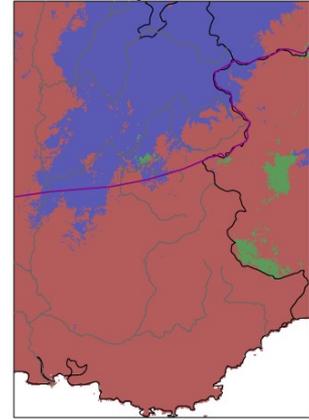
CIRCULATIONS ET PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES DANS LES ALPES



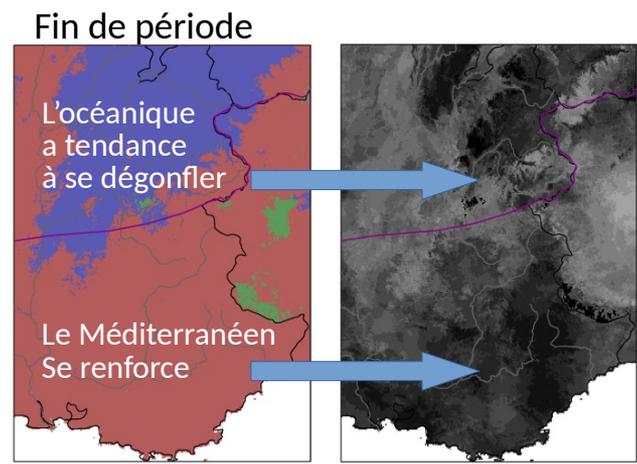
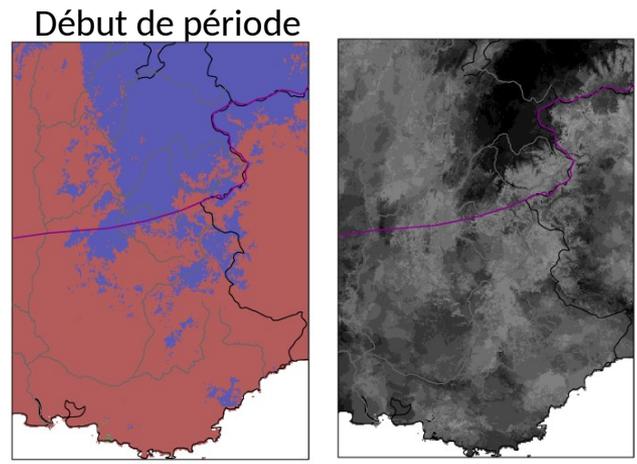
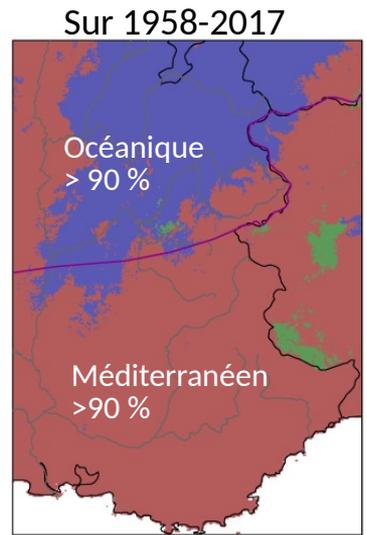
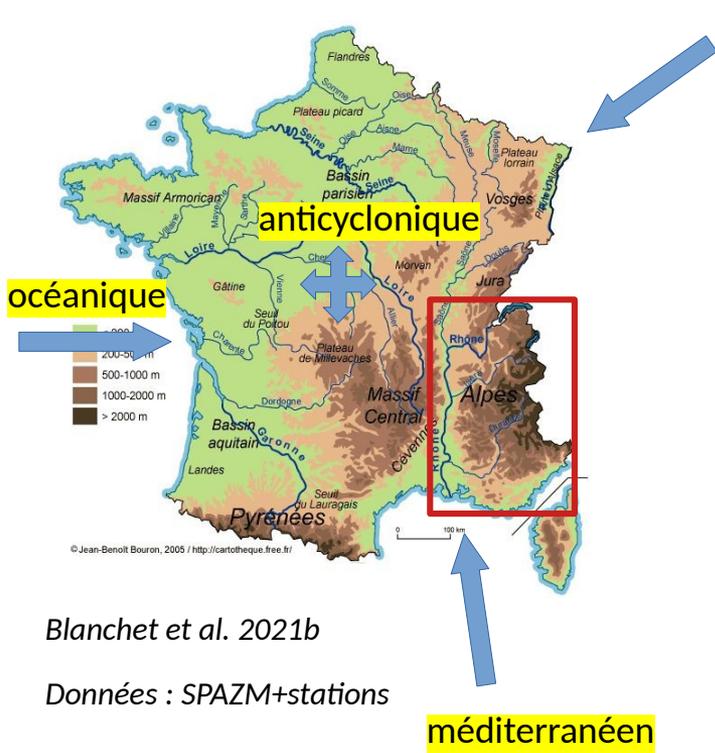
Début de période



Fin de période



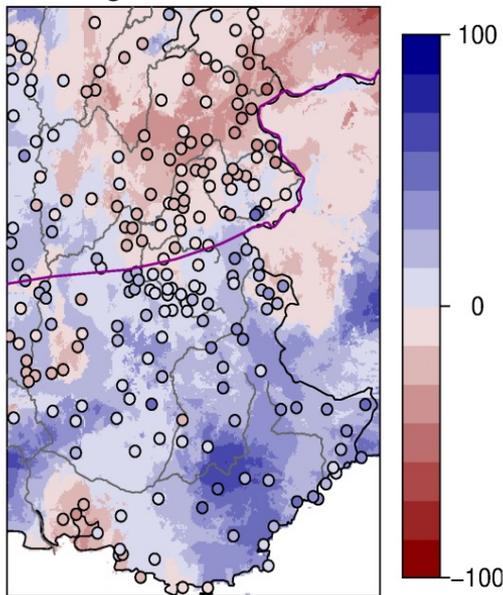
CIRCULATIONS ET PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES DANS LES ALPES



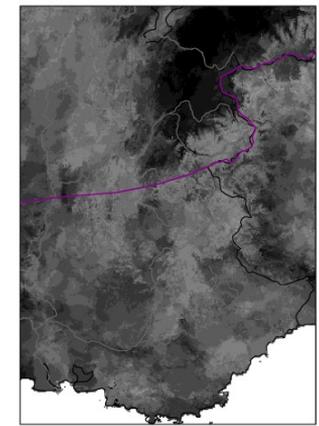
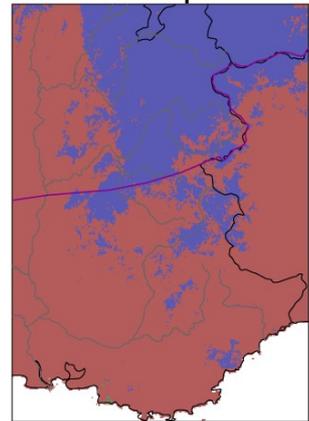
■ CIRCULATIONS ET PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES DANS LES ALPES



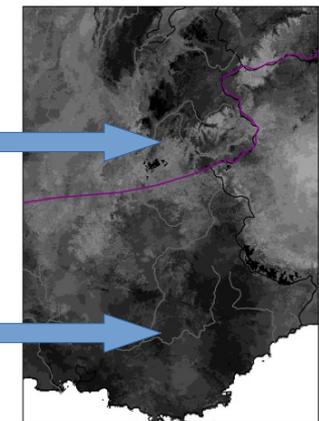
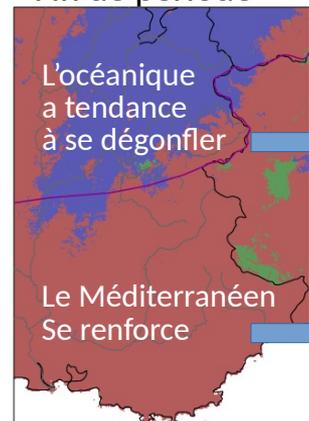
nord-est
% d'augmentation 1958-2017



Début de période



Fin de période



Blanchet et al. 2021a,b
Données : SPAZM+stations

→ les changements de précipitations extrêmes s'expliquent par des changements (±) des circulations les générant

→ Pas uniquement la magnitude des extrêmes peut changer,

Également leur étendue spatiale (*Wasko et al 2016*)



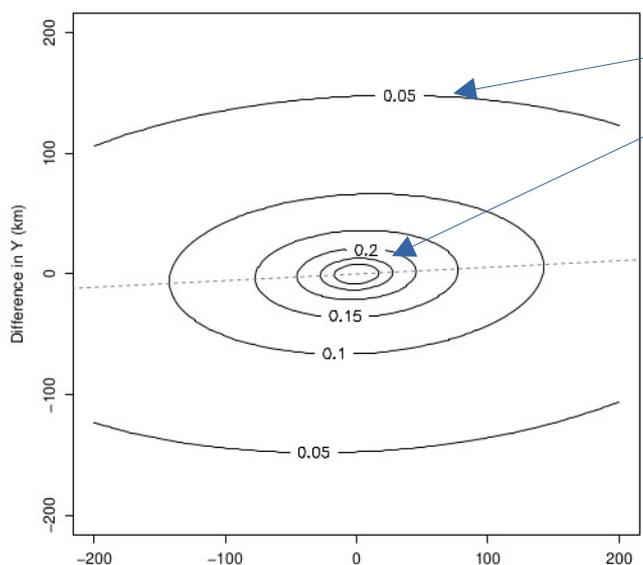
■ AU DELÀ DE L'INTENSITÉ : L'ÉTENDUE SPATIALE

$$\chi_{ij}(\eta) = \text{pr}(X_j > F_j^{-1}(\eta) | X_i > F_i^{-1}(\eta))$$

Probabilité conditionnelle d'avoir des extrêmes en deux points

= la « forme » des valeurs fortes des orages

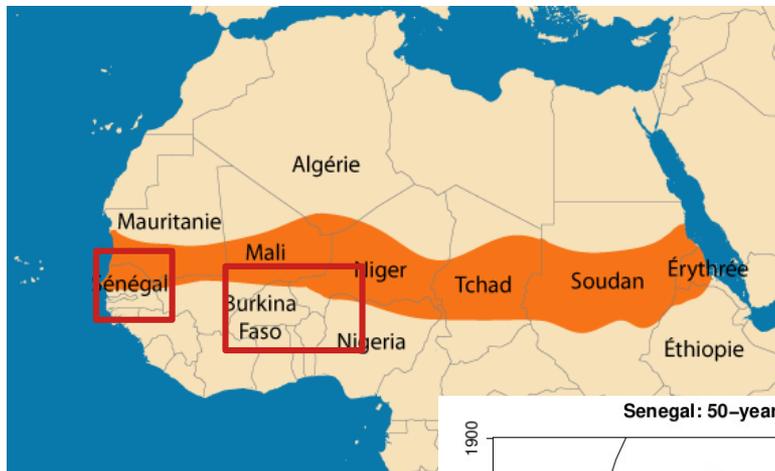
→ modélisé avec un modèle de Brown-Resnick sous forme d'ellipse (paramètres à estimer)



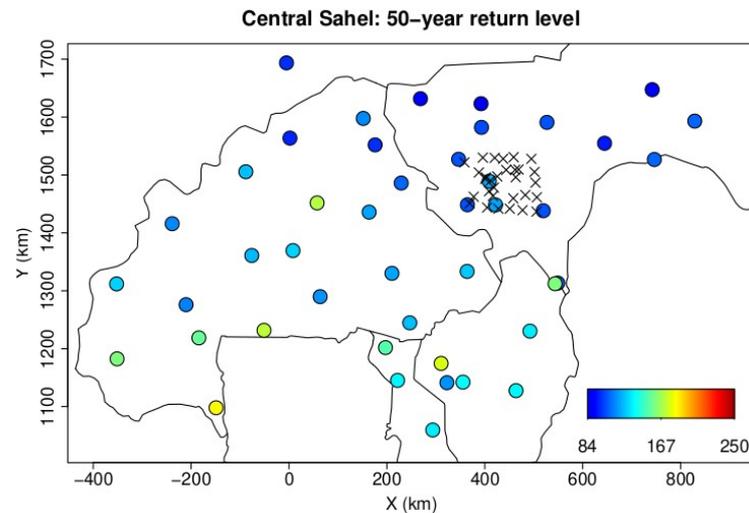
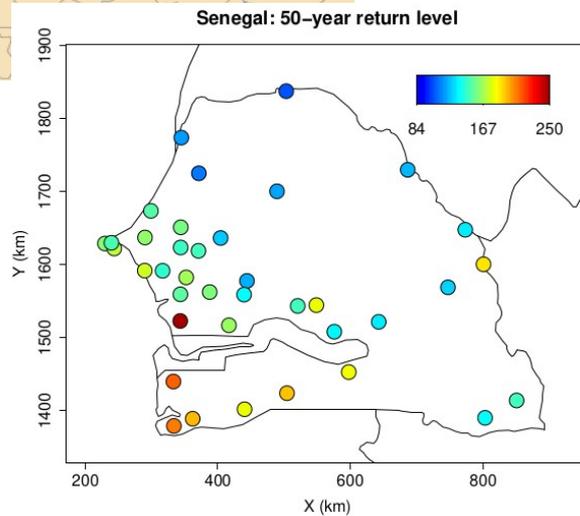
5 % de chance que les extrêmes s'étendent jusque là
20 %



■ LES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES EN AFRIQUE DE L'OUEST



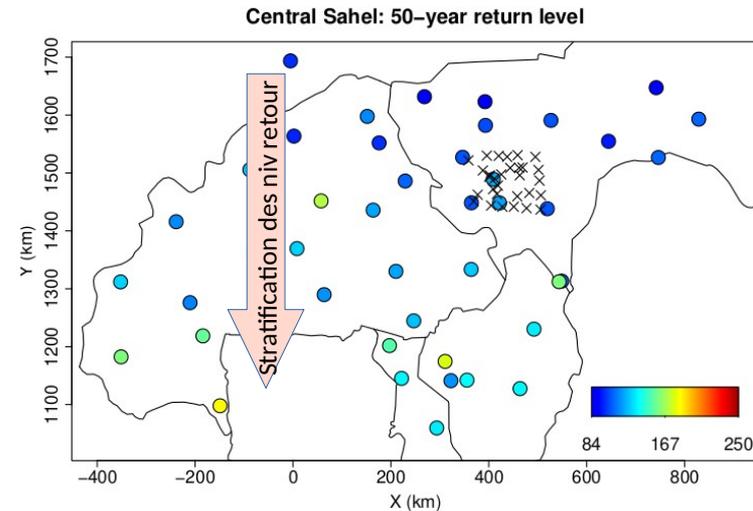
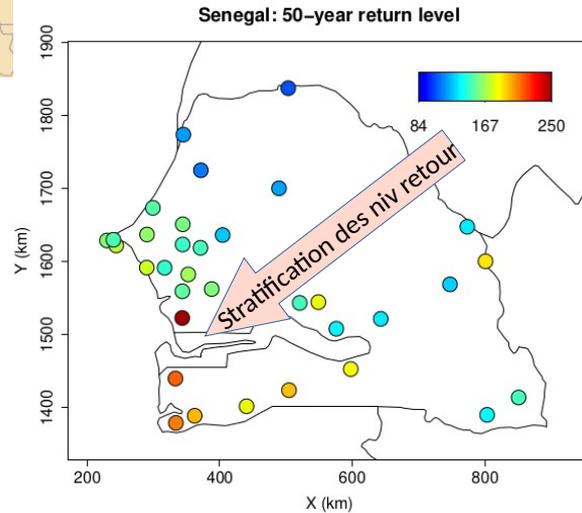
Blanchet et al. 2018
1950-2014



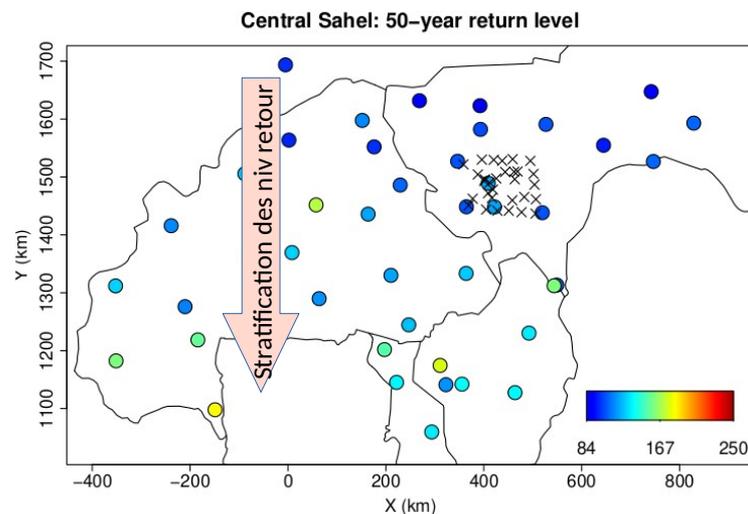
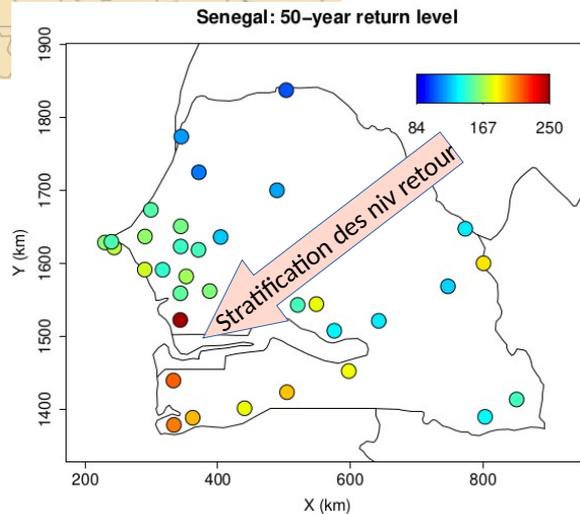
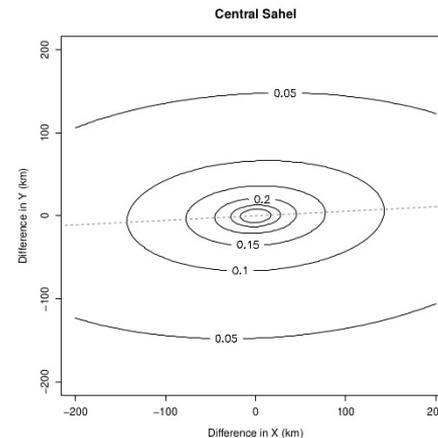
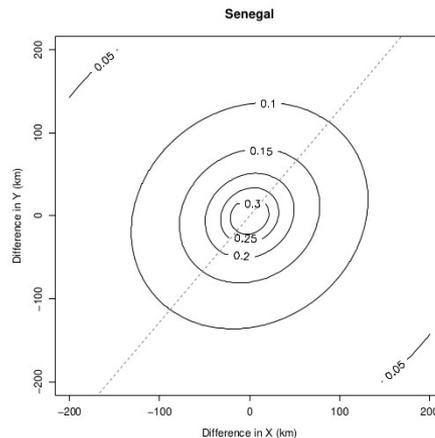
■ LES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES EN AFRIQUE DE L'OUEST



Blanchet et al. 2018
1950-2014

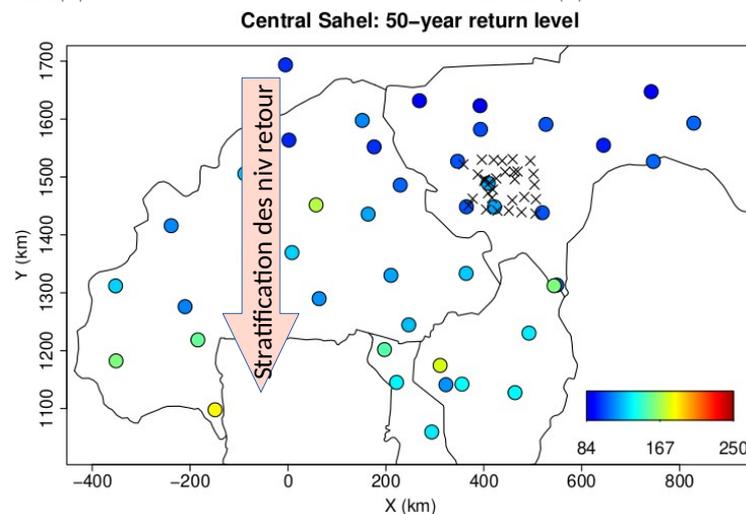
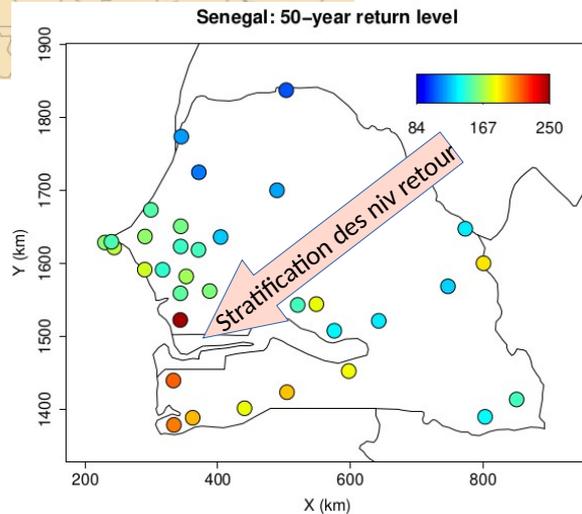
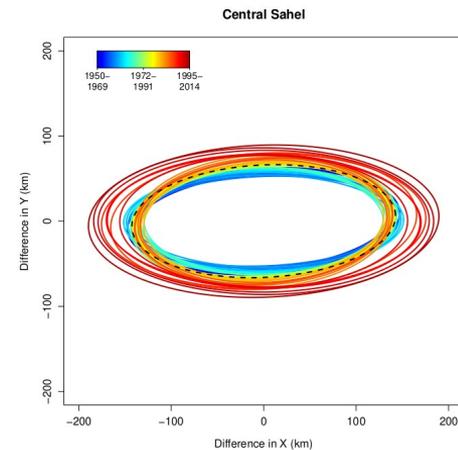
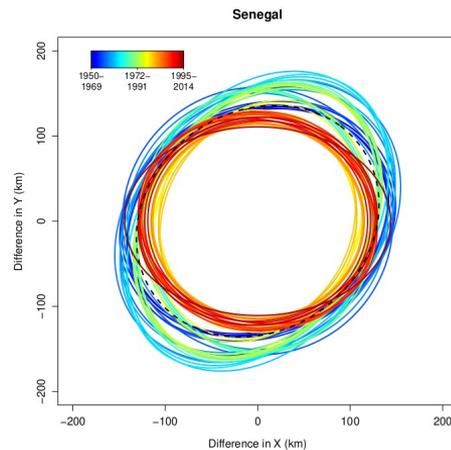


LES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES EN AFRIQUE DE L'OUEST



Blanchet et al. 2018
1950-2014

LES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES EN AFRIQUE DE L'OUEST



Blanchet et al. 2018

1950-2014



Difficulté en climat futur :

Extrêmes de précipitation dans les modèle du climat

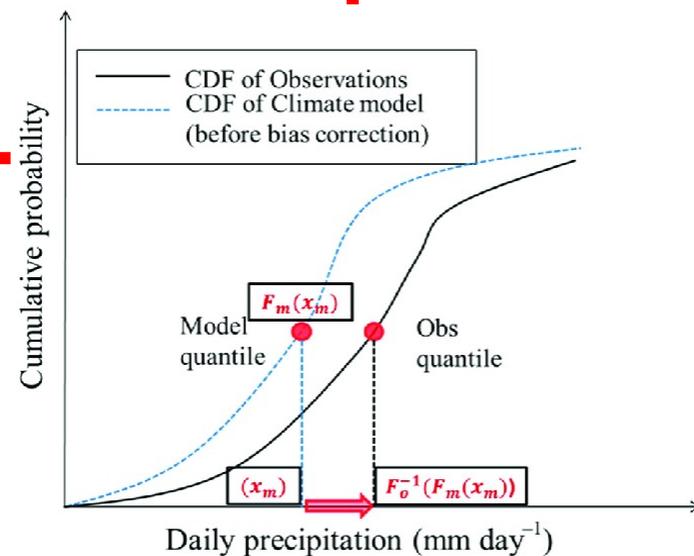
- Mal représentés / biaisés
- Débiaisage compliqué



Difficulté en climat futur :

Extrêmes de précipitation dans les modèle du climat

- Mal représentés / biaisés
- Débiaisage compliqué

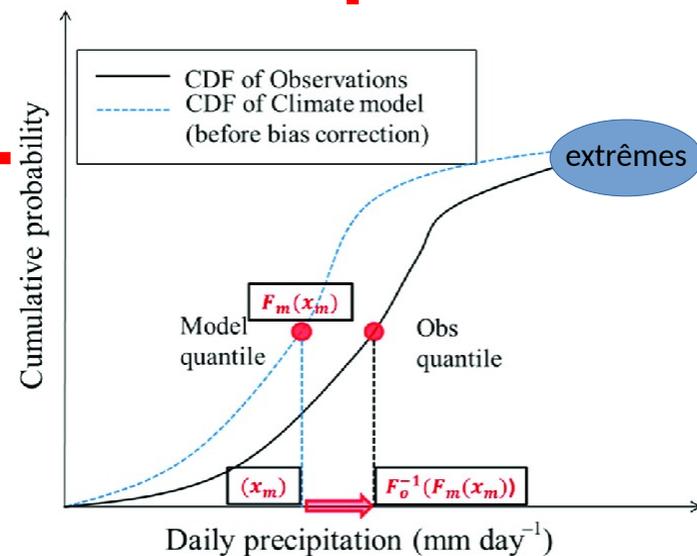




Difficulté en climat futur :

Extrêmes de précipitation dans les modèle du climat

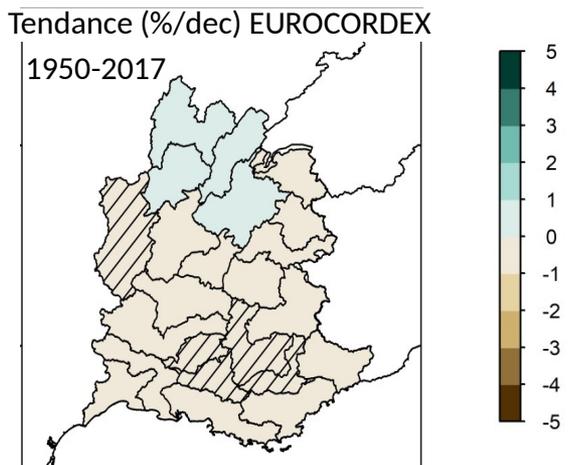
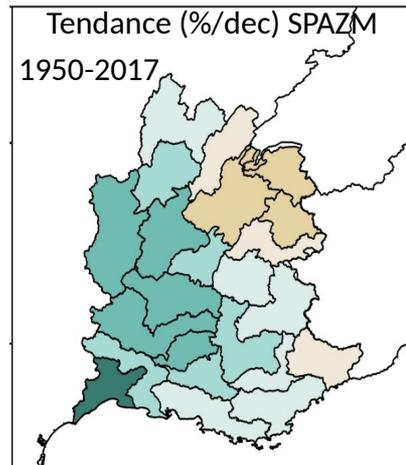
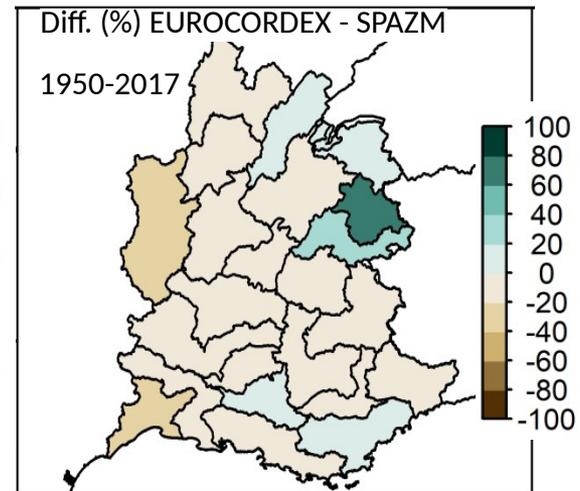
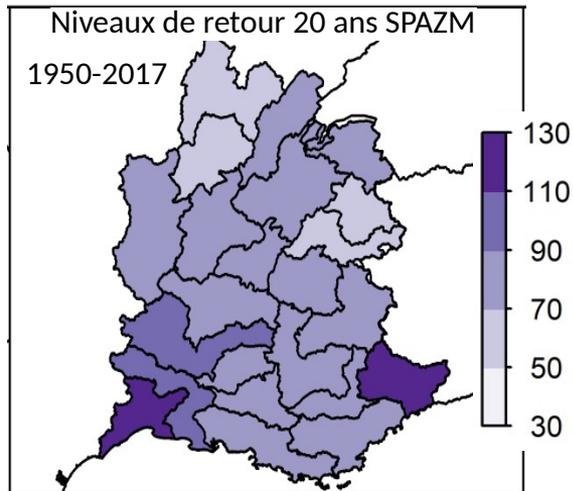
- Mal représentés / biaisés
- Débiaisage compliqué



LES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES EN CLIMAT FUTUR



@Castellanos2022



≠

CONCLUSION

- Extrêmes = rares = modèle statistique + données longues (mini 30 ou 60 ans)
- Il existe des modèles statistiques adaptés pour
 - Les calculs de **périodes de retour**
 - Les évolutions en **magnitude / fréquence**
 - Les évolutions en **répartition spatiale**
- Problème des précipitations extrêmes en climat futur

MERCI POUR VOTRE ATTENTION !

Références

- Blanchet, J.; Molinié, G. & Touati, J. (2018), 'Spatial analysis of trend in extreme daily rainfall in southern France', *Climate Dynamics* 51(3), 799-812.
- Blanchet, J.; Blanc, A. & Creutin, J.-D. (2021), 'Explaining recent trends in extreme precipitation in the Southwestern Alps by changes in atmospheric influences', *Weather and Climate Extremes* 33, 100356.
- Blanchet, J.; Creutin, J.-D. & Blanc, A. (2021), 'Retreating winter and strengthening autumn Mediterranean influence on extreme precipitation in the Southwestern Alps over the last 60 years', *Environmental Research Letters* 16(034056).
- Blanchet, J.; Aly, C.; Vischel, T.; Panthou, G.; Sané, Y. & Kane, M. D. (2018), 'Trend in the Co-Occurrence of Extreme Daily Rainfall in West Africa Since 1950', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- Naveau, P.; Huser, R.; Ribereau, P. & Hannart, A. (2016), 'Modeling jointly low, moderate, and heavy rainfall intensities without a threshold selection', *Water Resources Research* 52(4), 2753-2769.