



PROGRAMME  
DE RECHERCHE  
CLIMAT



## WEBINAIRE TRACCS

TRANSFORMER LA MODELISATION DU CLIMAT POUR LES SERVICES CLIMATIQUES

# Étude des épisodes méditerranéens : une approche par la modélisation climatique aux échelles kilométriques

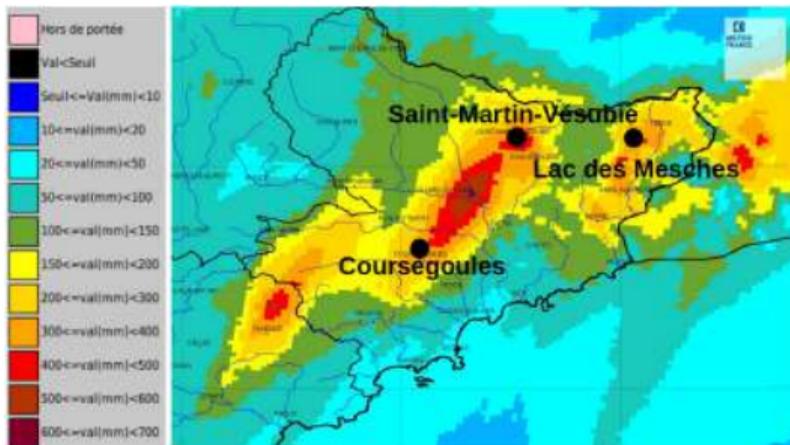
**Cécile Caillaud**<sup>1</sup> (cecile.caillaud@meteo.fr) PC 10 LOCALISING  
S. Somot<sup>1</sup>, H. Douville<sup>1</sup>, A. Alias<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, Toulouse, France

Vendredi 29/03/2024 de 11h à 12h

# L'épisode méditerranéen sur les Alpes-Maritimes des 2-3 octobre 2020

Cumuls  
en 24h

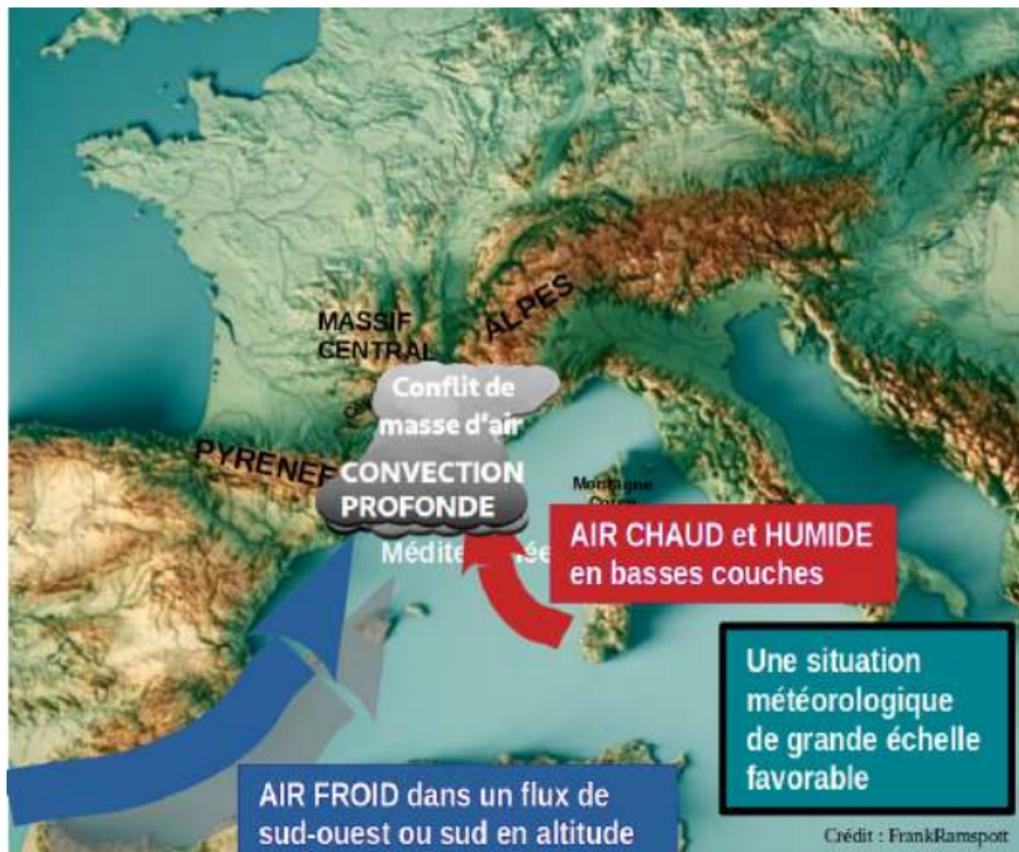


- Jusqu'à 663 mm en 24 h, 90 mm en 1 h
- Crues majeures de la Roya et de la Vésubie
- 18 victimes, 106 habitations et 12 ponts détruits, un milliard d'euros de dommages

*Kreitz 2021, Chochon et al. 2022*



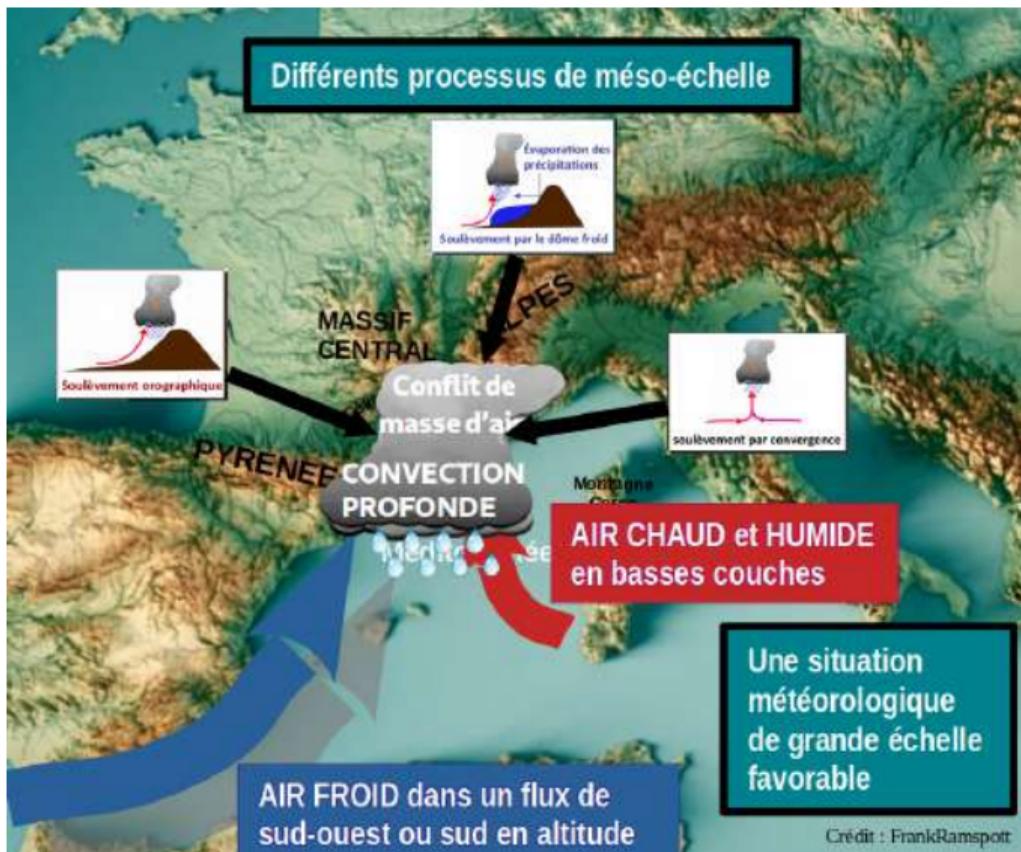
# Qu'est-ce qu'un épisode méditerranéen ?



- Episode méditerranéen, le plus souvent en automne
- ⇒ Cumuls de pluie très importants (plus de 100 mm en 24 h, voire en quelques heures)

*Ducrocq et al. 2008, Nuissier et al. 2008, 2011, Ricard et al. 2012, Khodoyar et al. 2021*

# Qu'est-ce qu'un épisode méditerranéen ?

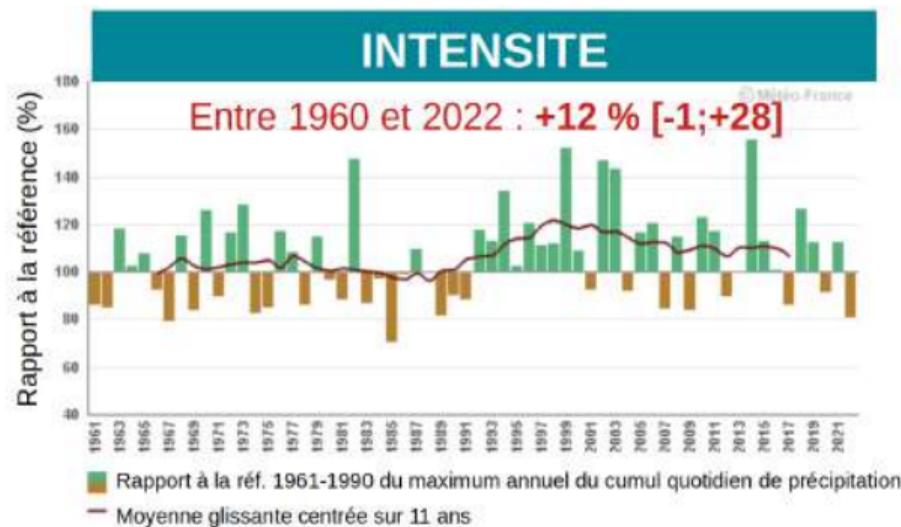


- Episode méditerranéen, le plus souvent en automne
- ⇒ Cumuls de pluie très importants (plus de 100 mm en 24 h, voire en quelques heures)

*Ducrocq et al. 2008, Nuissier et al. 2008, 2011, Ricard et al. 2012, Khodoyar et al. 2021*

# Tendance climatique passée des épisodes méditerranéens français

Sur la France, depuis le milieu du XXe siècle, plusieurs études s'accordent pour :



D'après Ribes et al. 2019 remis à jour 2022 (80 stations)

- une intensification des épisodes méditerranéens : +12 % [-1 ;+28]
- une augmentation de fréquence pour les épisodes les plus forts : x2,0 [1,0 ;3,9] pour les événements > 200 mm/j
- des plages d'incertitude larges en raison de la forte variabilité interannuelle

Vautard et al. 2015, Blanchet et al. 2018, 2022, Ribes et al. 2019

# Evolution future des pluies extrêmes méditerranéennes



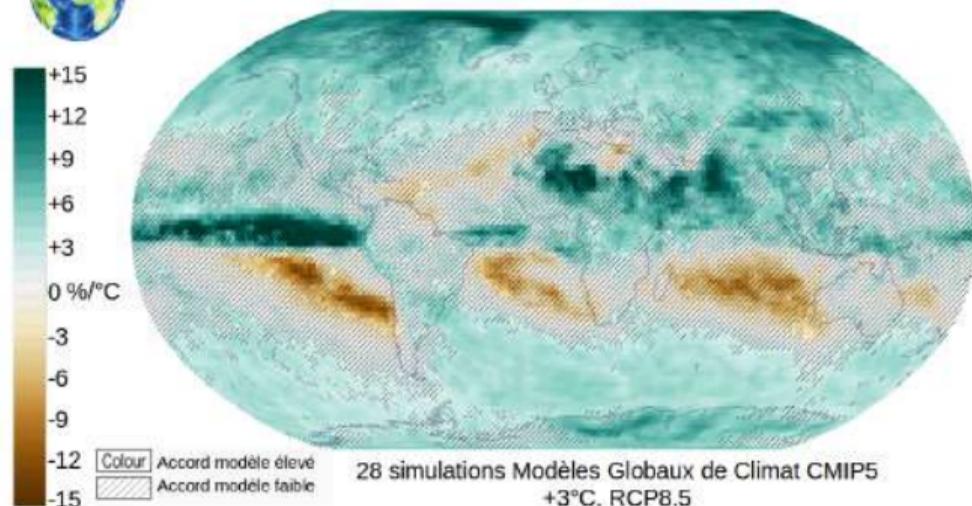
"A l'échelle mondiale, il est projeté que les précipitations journalières extrêmes s'intensifieront d'environ 7 % pour chaque degré de réchauffement planétaire supplémentaire (degré de confiance élevé)"

(B.2.4 Résumé à l'Intention des Décideurs, GIEC, AR6, WGI, 2021)

MODELES GLOBAUX  
DE CLIMAT  
Maille - 150km



Changements des maxima de précipitation  
quotidienne de l'automne (SOND)



D'après GIEC-WGI Atlas Interactif (Iturbide et al. 2021, Gutierrez et al. 2021)

- Des disparités régionales
- Accord faible sur la Méditerranée avec des différences importantes suivant les simulations de modèles climatiques

# Evolution future des pluies extrêmes méditerranéennes



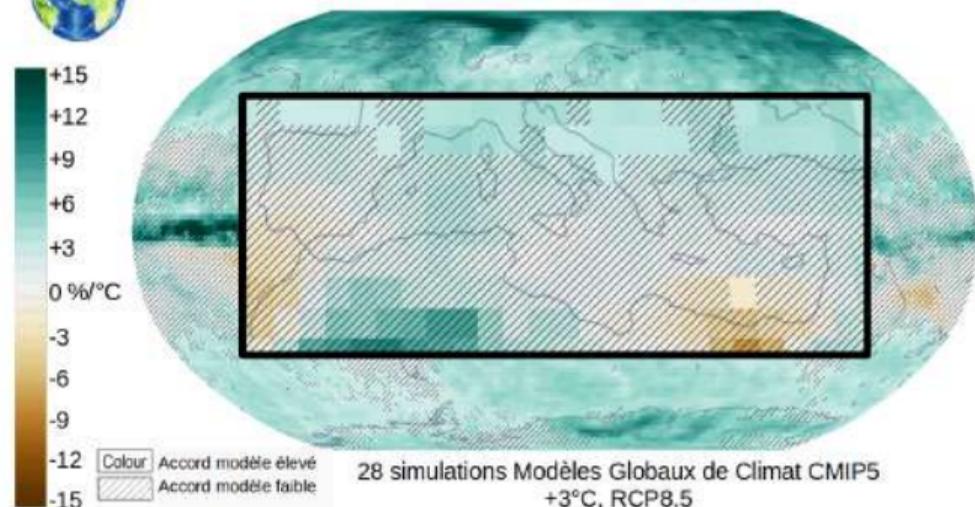
"A l'échelle mondiale, il est projeté que les précipitations journalières extrêmes s'intensifieront d'environ 7 % pour chaque degré de réchauffement planétaire supplémentaire (degré de confiance élevé)"

(B.2.4 Résumé à l'Intention des Décideurs, GIEC, AR6, WGI, 2021)

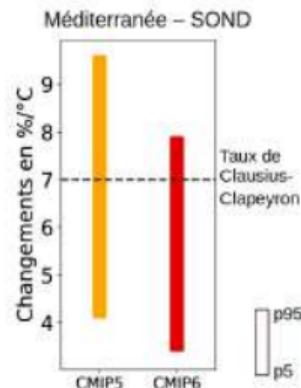
MODELES GLOBAUX  
DE CLIMAT  
Maille - 130km



Changements des maxima de précipitation  
quotidienne de l'automne (SOND)



D'après GIEC-WGI Atlas Interactif (Iturbide et al. 2021, Gutierrez et al. 2021)



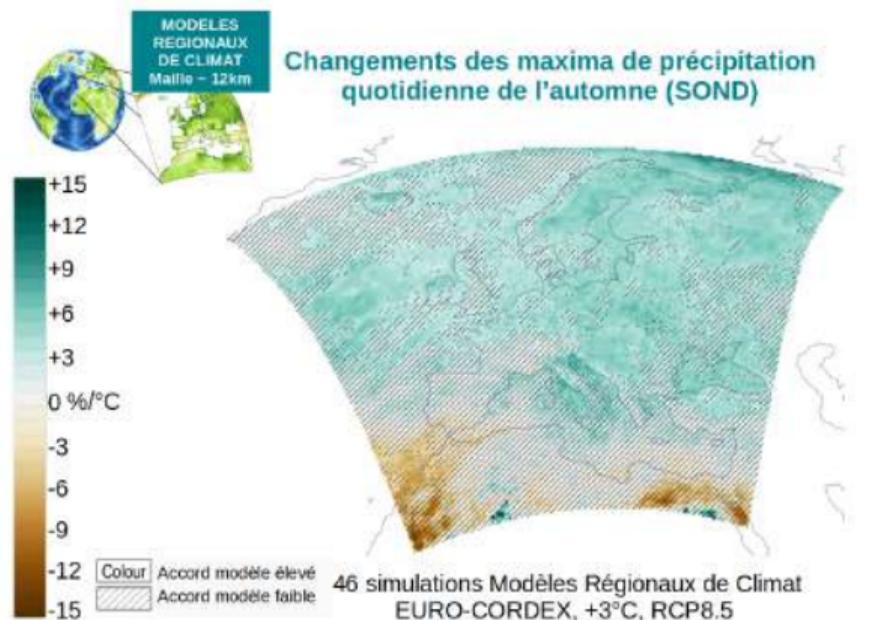
- Des disparités régionales
- Accord faible sur la Méditerranée avec des différences importantes suivant les simulations de modèles climatiques

# Evolution future des pluies extrêmes méditerranéennes



"A l'échelle mondiale, il est projeté que les précipitations journalières extrêmes s'intensifieront d'environ 7 % pour chaque degré de réchauffement planétaire supplémentaire (degré de confiance élevé)"

(B.2.4 Résumé à l'Intention des Décideurs, GIEC, AR6, WGI, 2021)



D'après GIEC-WGI Atlas Interactif (Iturbide et al. 2021, Guttierrez et al. 2021)

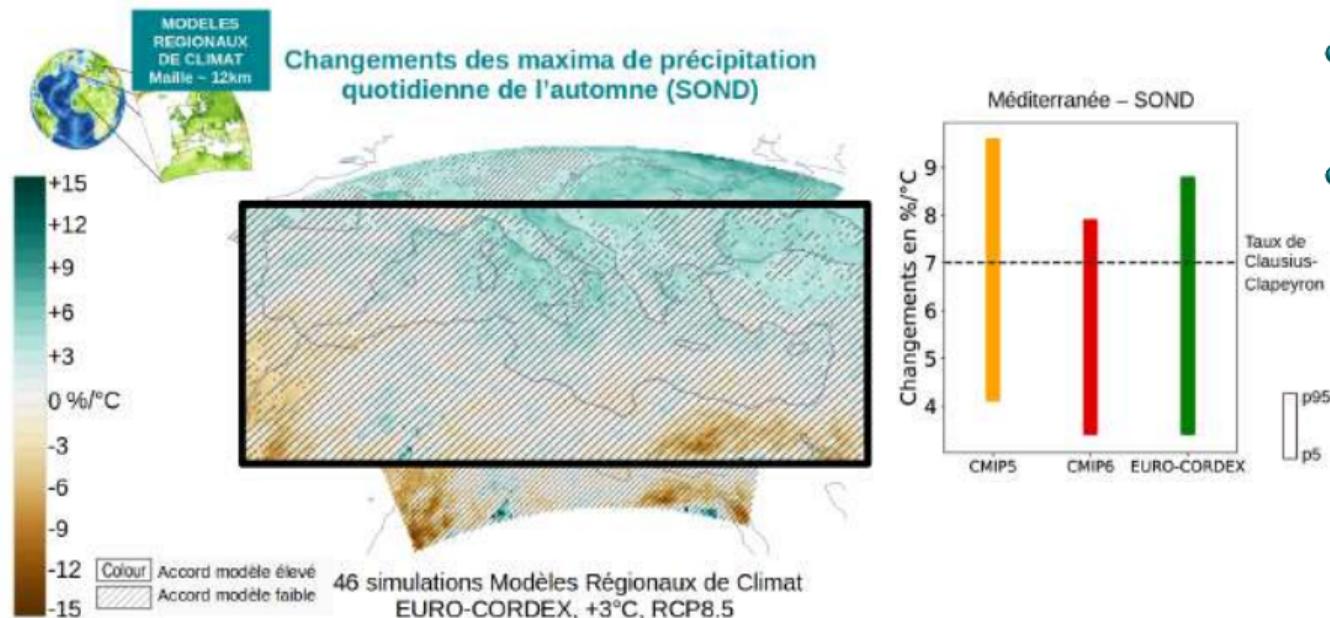
- Des disparités régionales
- Accord faible sur la Méditerranée avec des différences importantes suivant les simulations de modèles climatiques

# Evolution future des pluies extrêmes méditerranéennes



"A l'échelle mondiale, il est projeté que les précipitations journalières extrêmes s'intensifieront d'environ 7 % pour chaque degré de réchauffement planétaire supplémentaire (degré de confiance élevé)"

(B.2.4 Résumé à l'Intention des Décideurs, GIEC, AR6, WGI, 2021)



D'après GIEC-WGI Atlas Interactif (Turbide et al. 2021, Gutierrez et al. 2021)

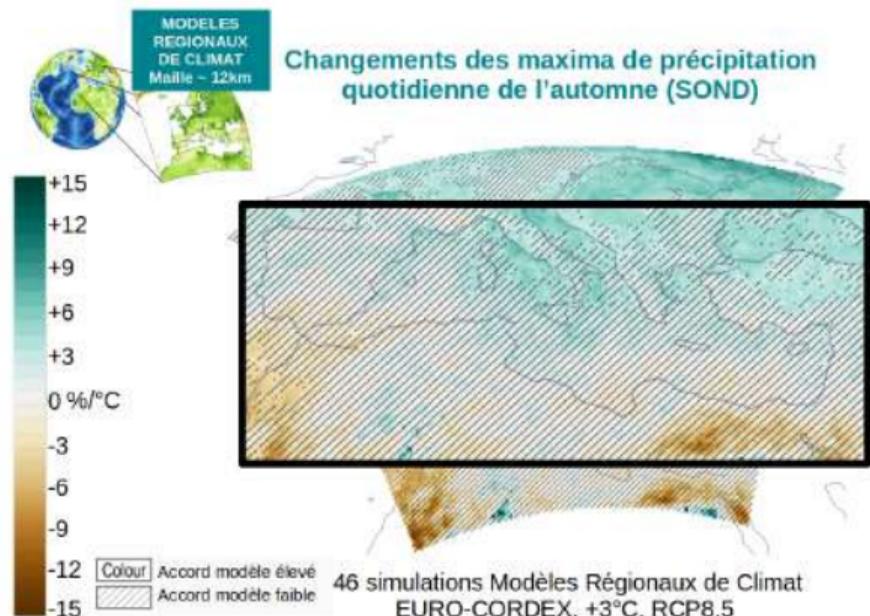
- Des disparités régionales
- Accord faible sur la Méditerranée avec des différences importantes suivant les simulations de modèles climatiques

# Evolution future des pluies extrêmes méditerranéennes

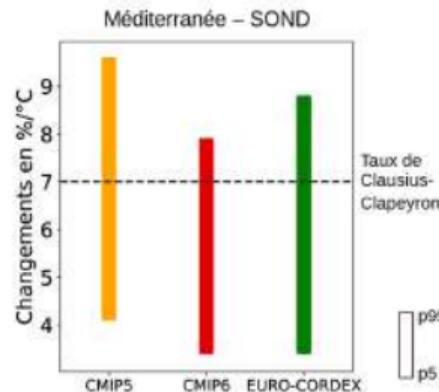


"A l'échelle mondiale, il est projeté que les précipitations journalières extrêmes s'intensifieront d'environ 7 % pour chaque degré de réchauffement planétaire supplémentaire (degré de confiance élevé)"

(B.2.4 Résumé à l'Intention des Décideurs, GIEC, AR6, WGI, 2021)



D'après GIEC-WGI Atlas Interactif (Turbide et al. 2021, Gutierrez et al. 2021)

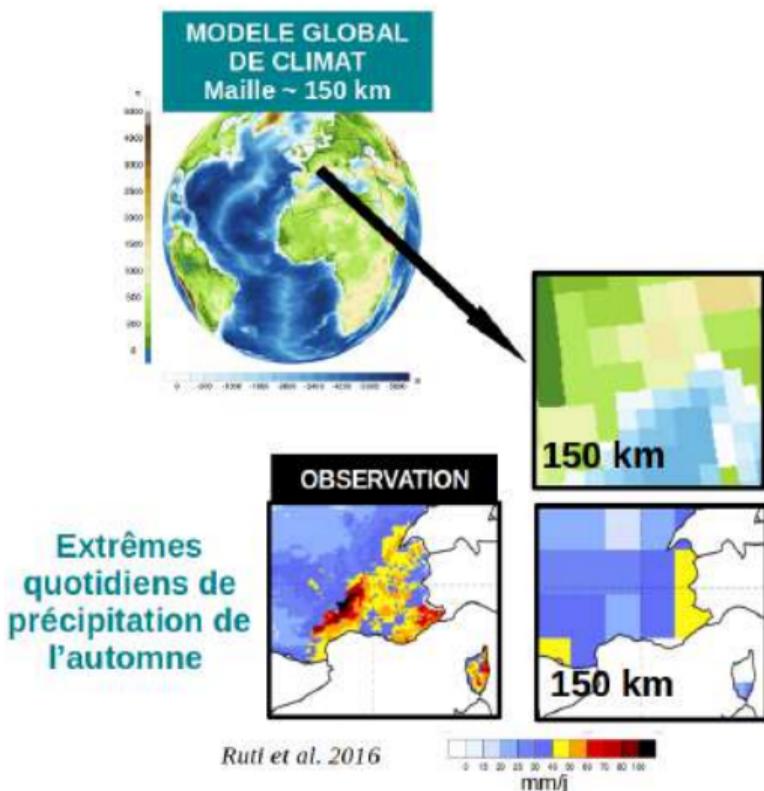


- Des disparités régionales
- Accord faible sur la Méditerranée avec des différences importantes suivant les simulations de modèles climatiques

## Premier verrou

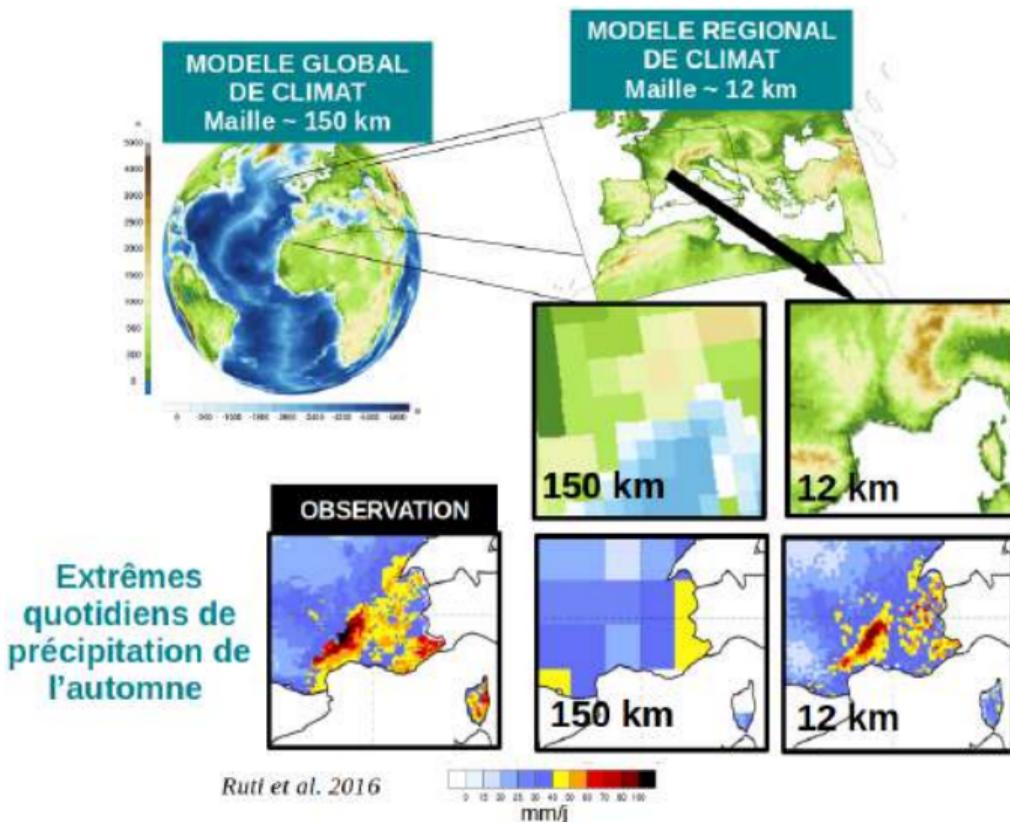
Importantes incertitudes sur l'évolution des pluies extrêmes dans le bassin méditerranéen

# Les épisodes méditerranéens vus par les modèles de climat



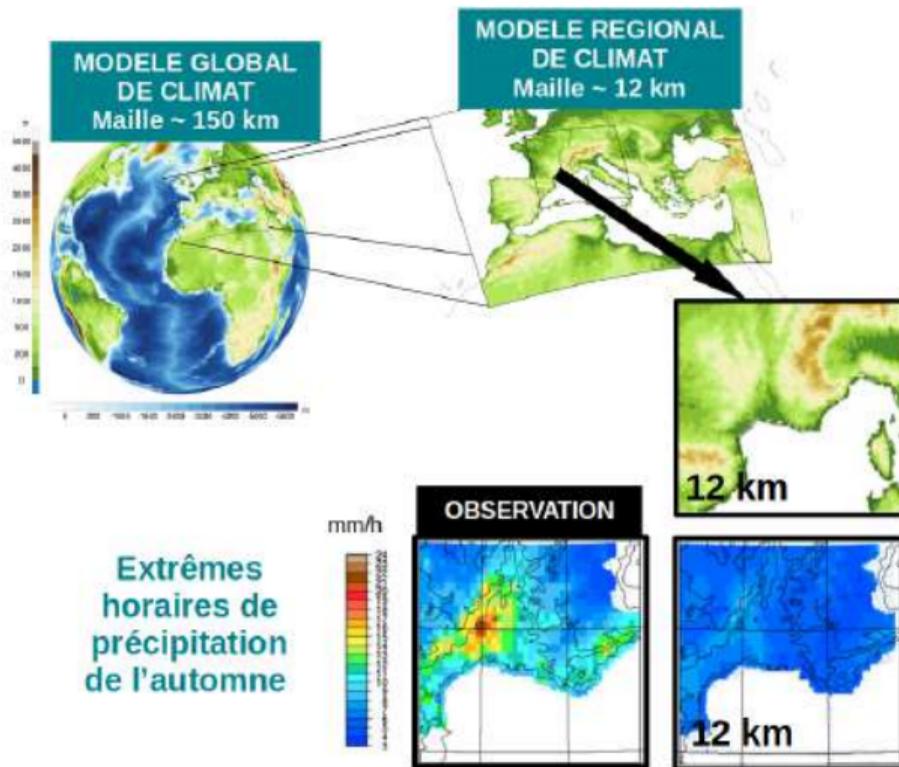
- Les modèles globaux ne permettent pas une représentation correcte des extrêmes quotidiens méditerranéens
- Les modèles régionaux ne permettent pas une représentation correcte des extrêmes horaires méditerranéens

# Les épisodes méditerranéens vus par les modèles de climat



- Les modèles globaux ne permettent pas une représentation correcte des extrêmes quotidiens méditerranéens
- Les modèles régionaux ne permettent pas une représentation correcte des extrêmes horaires méditerranéens

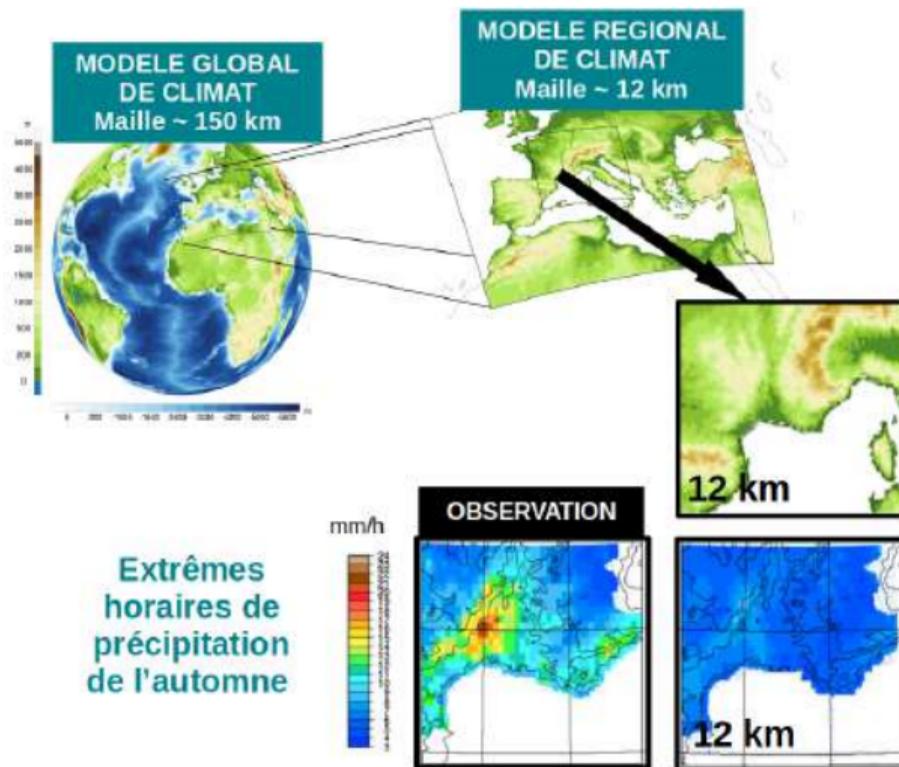
# Les épisodes méditerranéens vus par les modèles de climat



Fumière et al. 2020

- Les modèles globaux ne permettent pas une représentation correcte des extrêmes quotidiens méditerranéens
- Les modèles régionaux ne permettent pas une représentation correcte des extrêmes horaires méditerranéens

# Les épisodes méditerranéens vus par les modèles de climat



Fumière et al. 2020

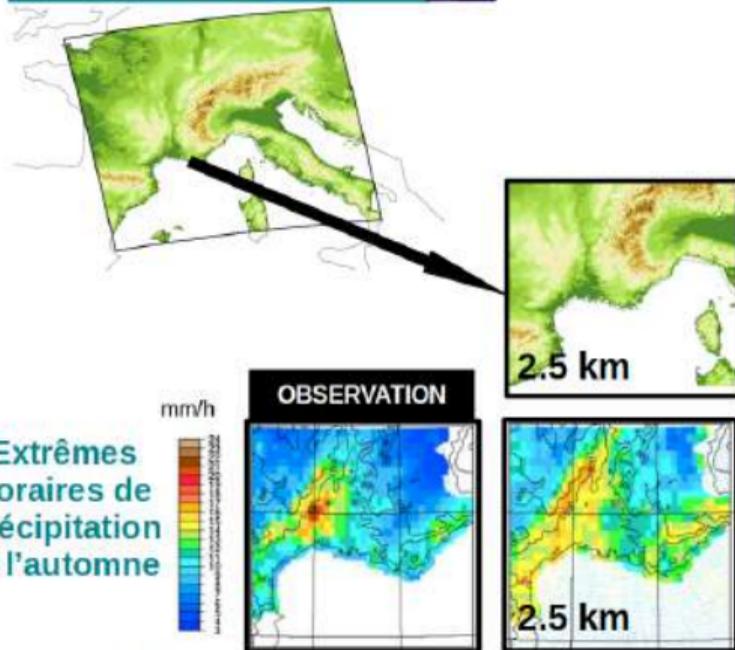
- Les modèles globaux ne permettent pas une représentation correcte des extrêmes quotidiens méditerranéens
- Les modèles régionaux ne permettent pas une représentation correcte des extrêmes horaires méditerranéens

## Deuxième verrou

Les modèles climatiques actuels représentent mal les processus de méso-échelle des épisodes méditerranéens

# Les modèles régionaux de climat à résolution kilométrique

MODELE REGIONAL DE CLIMAT  
A HAUTE RESOLUTION  
Maille ~ 2-3 km



Fumière et al. 2020

Une nouvelle génération de modèles régionaux de climat à résolution kilométrique (2–3 km)

- ⇒ Meilleure représentation de la topographie
- ⇒ La convection profonde n'est plus paramétrisée, mais explicitement résolue par la dynamique du modèle
- ⇒ Meilleure représentation des systèmes orageux

## Questions scientifiques

Les modèles de climat à résolution kilométrique sont-ils capables de représenter correctement les épisodes méditerranéens en climat présent ?

Que révèlent ces modèles sur la réponse des épisodes méditerranéens au changement climatique ? Quelles nouvelles informations apportent-ils ? Quels sont les changements robustes mis en évidence, mais aussi quelles incertitudes persistent ?

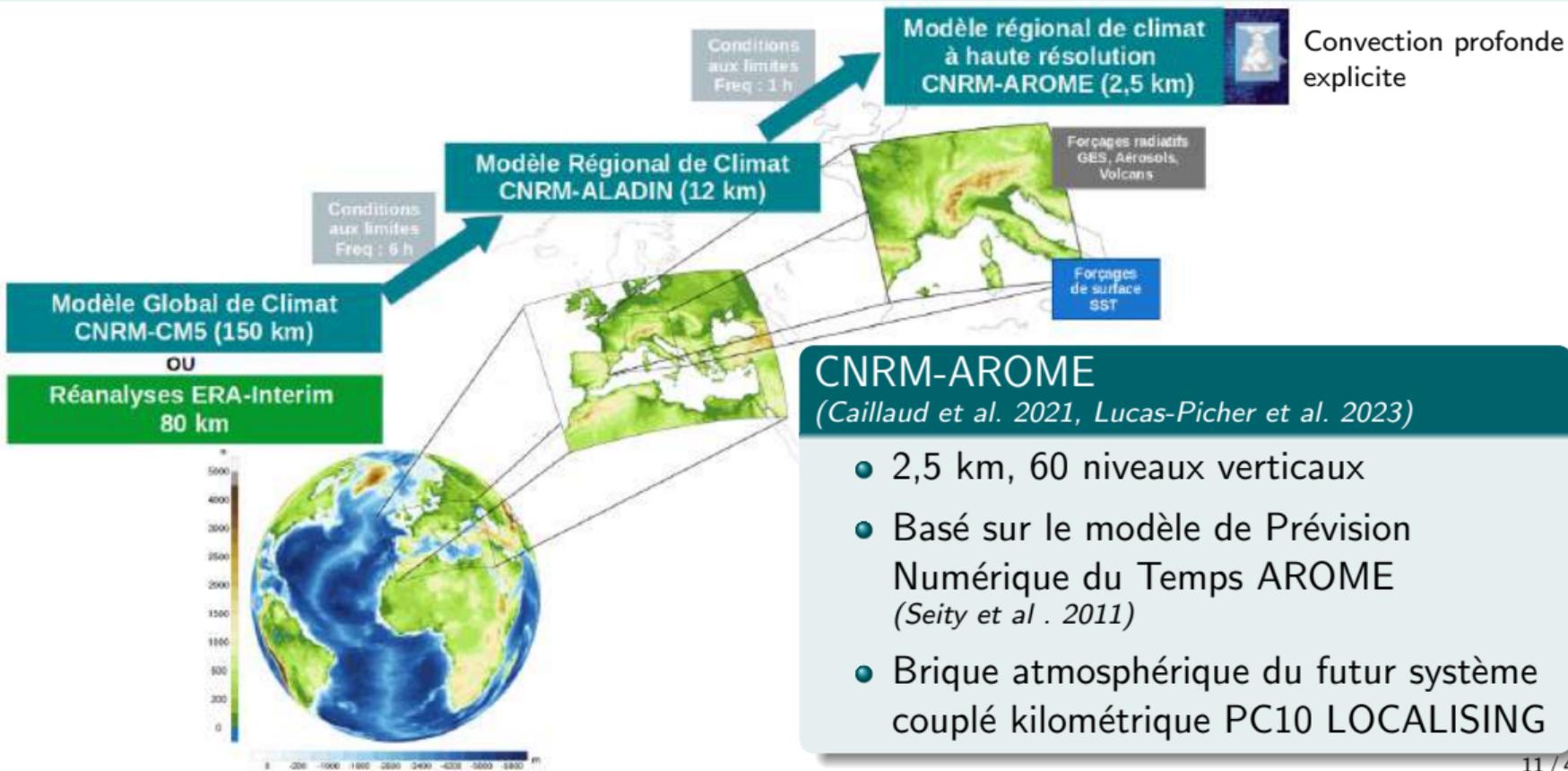
# Plan de la présentation

- 1 Introduction
- 2 Méthodologie
  - La nouvelle génération de modèle de climat à résolution kilométrique
  - L'approche objet appliquée aux pluies extrêmes
- 3 Evaluation pour la simulation des épisodes méditerranéens
- 4 Evolution future des épisodes méditerranéens
- 5 Conclusion sur les épisodes méditerranéens
- 6 Autres applications : quelques exemples avec CNRM-AROME

# Plan de la présentation

- 1 Introduction
- 2 **Méthodologie**
  - La nouvelle génération de modèle de climat à résolution kilométrique
  - L'approche objet appliquée aux pluies extrêmes
- 3 Evaluation pour la simulation des épisodes méditerranéens
- 4 Evolution future des épisodes méditerranéens
- 5 Conclusion sur les épisodes méditerranéens
- 6 Autres applications : quelques exemples avec CNRM-AROME

# Les simulations avec CNRM-AROME 2,5 km



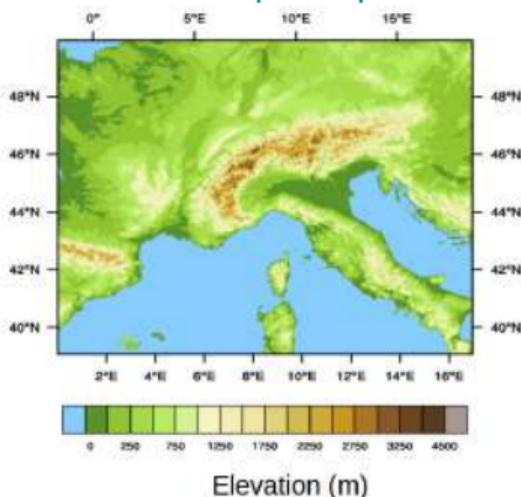
# Les simulations de l'ensemble du FPS Convection

Premier grand ensemble de simulation de modèles de climat à résolution kilométrique grâce au programme CORDEX FPS on Convection (Coppola et al. 2020, Ban et al. 2021, Pichelli et al. 2021) :

- Maille de 2–3 km
- Convection profonde explicite
- Domaine commun, périodes communes



## Le domaine pan-alpin



## Les familles de modèles

A partir de  
Modèles de  
Prévision  
Numérique du  
Temps



A partir de  
Modèles  
Régionaux de  
Climat



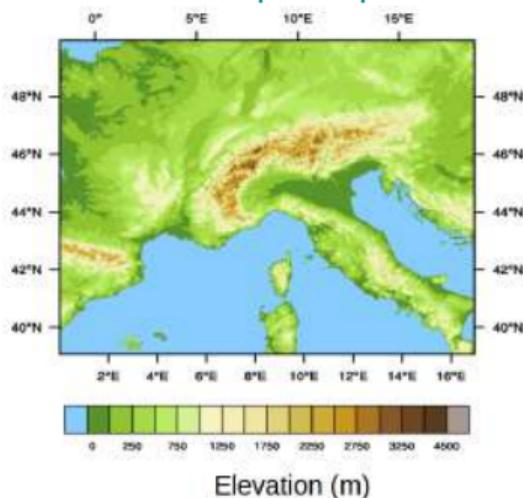
# Les simulations de l'ensemble du FPS Convection

Premier grand ensemble de simulation de modèles de climat à résolution kilométrique grâce au programme CORDEX FPS on Convection (Coppola et al. 2020, Ban et al. 2021, Pichelli et al. 2021) :

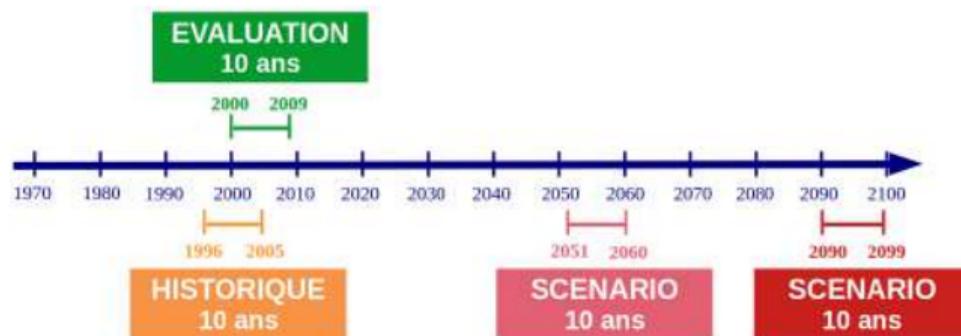
- Maille de 2–3 km
- Convection profonde explicite
- Domaine commun, périodes communes



## Le domaine pan-alpin



## Les périodes de 10 ans



Scénario choisi : RCP8.5

# L'étude des précipitations extrêmes

Deux approches statistiques :

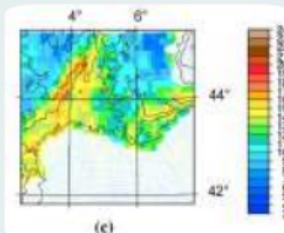
## Approche eulérienne

"On se place en un point donné fixe"



Indicateurs **pour chaque maille** :

- Maxima annuels de précipitation quotidienne
- Extrêmes quotidiens de précipitation (Percentiles 99 %)
- Extrêmes horaires de précipitation (Percentiles 99.9 %)



Extrêmes horaires de précipitation de l'automne (mm/h)  
(Fumière et al. 2020)

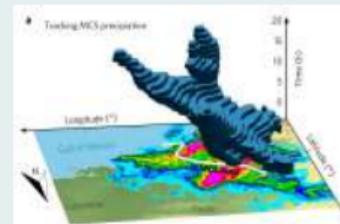
## Approche lagrangienne (ou objet)

"On suit le système au cours du temps"



**Pour chaque système fortement précipitant :**

- Etude de la propagation et des caractéristiques intrinsèques des systèmes (durée, intensité, surface, vitesse...)
- Possible en climat grâce à la bonne représentation des précipitations horaires par les modèles de climat à résolution kilométrique



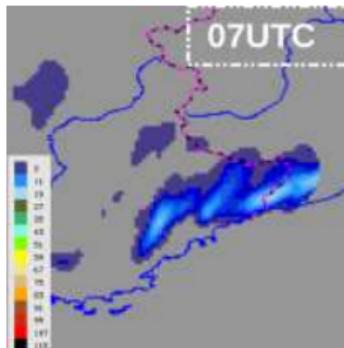
Evolution d'un système convectif au cours du temps  
(Prein et al. 2017)

# L'approche lagrangienne (ou objet) pour l'étude des pluies extrêmes

- Outil de détection et de suivi des systèmes précipitants (OSIRIS) (*Morel et Senesi. 2002, Brousseau et al. 2016*)

## 1. Détection ⇒ Cellules

A partir des cumuls horaires de précipitation (seuil=10mm/h)

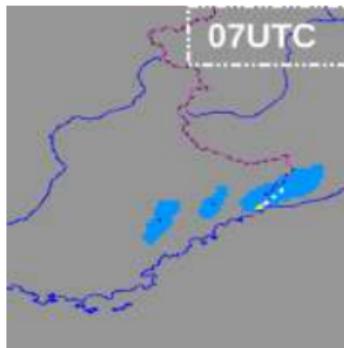


# L'approche lagrangienne (ou objet) pour l'étude des pluies extrêmes

- Outil de détection et de suivi des systèmes précipitants (OSIRIS) (*Morel et Senesi. 2002, Brousseau et al. 2016*)

## 1. Détection ⇒ Cellules

A partir des cumuls horaires de précipitation (seuil=10mm/h)

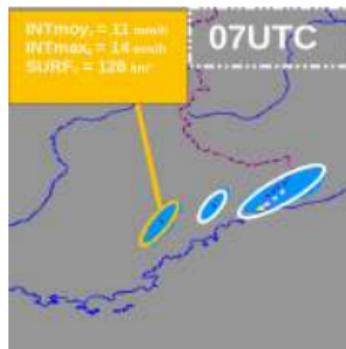


# L'approche lagrangienne (ou objet) pour l'étude des pluies extrêmes

- Outil de détection et de suivi des systèmes précipitants (OSIRIS) (*Morel et Senesi. 2002, Brousseau et al. 2016*)

## 1. Détection ⇒ Cellules

A partir des cumuls horaires de précipitation (seuil=10mm/h)

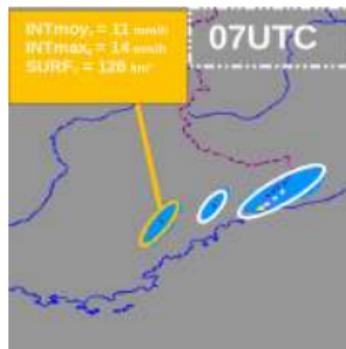


# L'approche lagrangienne (ou objet) pour l'étude des pluies extrêmes

- Outil de détection et de suivi des systèmes précipitants (OSIRIS) (*Morel et Senesi. 2002, Brousseau et al. 2016*)

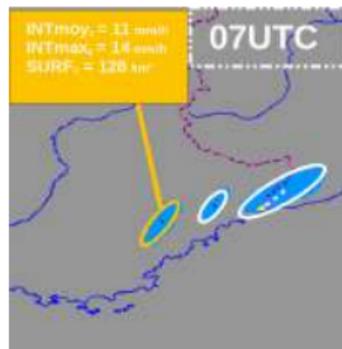
## 1. Détection ⇒ Cellules

A partir des cumuls horaires de précipitation (seuil=10mm/h)



## 2. Suivi ⇒ Trajectoires - - -

Conditions de recouvrement et de corrélation entre cellules

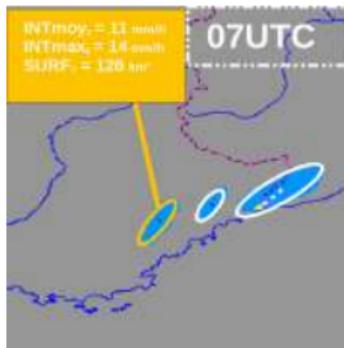


# L'approche lagrangienne (ou objet) pour l'étude des pluies extrêmes

- Outil de détection et de suivi des systèmes précipitants (OSIRIS) (Morel et Senesi. 2002, Brousseau et al. 2016)

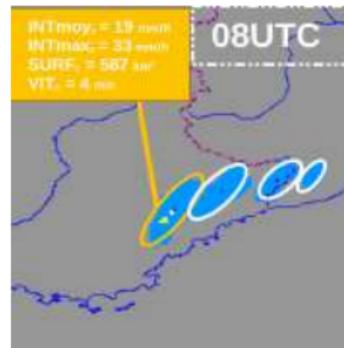
## 1. Détection ⇒ Cellules

A partir des cumuls horaires de précipitation (seuil=10mm/h)



## 2. Suivi ⇒ Trajectoires - - -

Conditions de recouvrement et de corrélation entre cellules

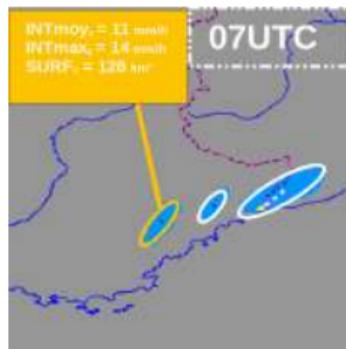


# L'approche lagrangienne (ou objet) pour l'étude des pluies extrêmes

- Outil de détection et de suivi des systèmes précipitants (OSIRIS) (*Morel et Senesi. 2002, Brousseau et al. 2016*)

## 1. Détection ⇒ Cellules

A partir des cumuls horaires de précipitation (seuil=10mm/h)



## 2. Suivi ⇒ Trajectoires - - -

Conditions de recouvrement et de corrélation entre cellules

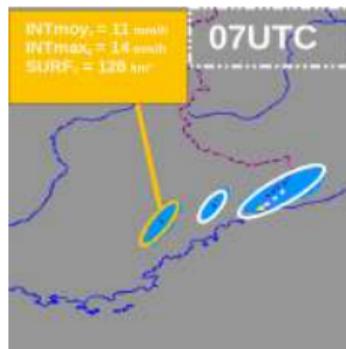


# L'approche lagrangienne (ou objet) pour l'étude des pluies extrêmes

- Outil de détection et de suivi des systèmes précipitants (OSIRIS) (*Morel et Senesi. 2002, Brousseau et al. 2016*)

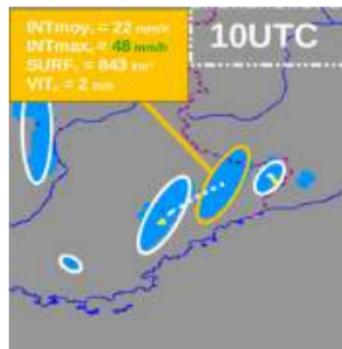
## 1. Détection ⇒ Cellules

A partir des cumuls horaires de précipitation (seuil=10mm/h)



## 2. Suivi ⇒ Trajectoires - - -

Conditions de recouvrement et de corrélation entre cellules

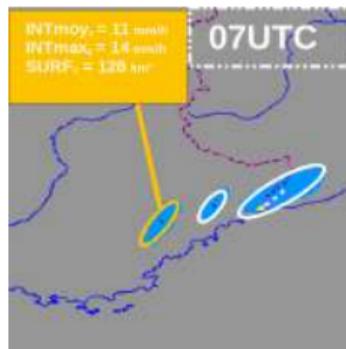


# L'approche lagrangienne (ou objet) pour l'étude des pluies extrêmes

- Outil de détection et de suivi des systèmes précipitants (OSIRIS) (*Morel et Senesi. 2002, Brousseau et al. 2016*)

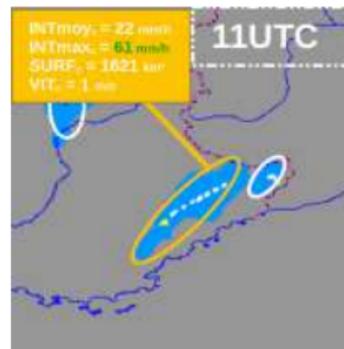
## 1. Détection ⇒ Cellules

A partir des cumuls horaires de précipitation (seuil=10mm/h)



## 2. Suivi ⇒ Trajectoires - - -

Conditions de recouvrement et de corrélation entre cellules

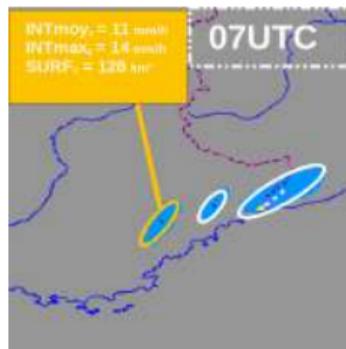


# L'approche lagrangienne (ou objet) pour l'étude des pluies extrêmes

- Outil de détection et de suivi des systèmes précipitants (OSIRIS) (*Morel et Senesi. 2002, Brousseau et al. 2016*)

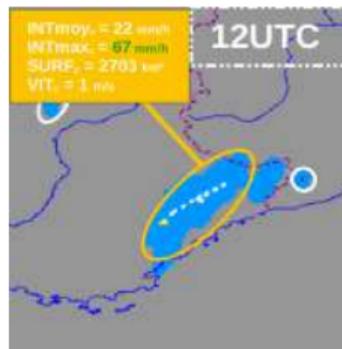
## 1. Détection ⇒ Cellules

A partir des cumuls horaires de précipitation (seuil=10mm/h)



## 2. Suivi ⇒ Trajectoires - - -

Conditions de recouvrement et de corrélation entre cellules

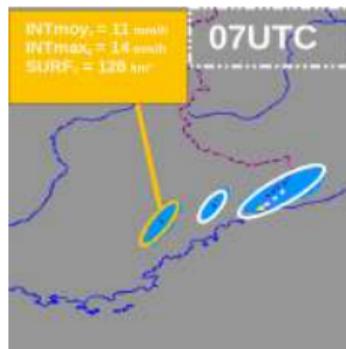


# L'approche lagrangienne (ou objet) pour l'étude des pluies extrêmes

- Outil de détection et de suivi des systèmes précipitants (OSIRIS) (*Morel et Senesi. 2002, Brousseau et al. 2016*)

## 1. Détection ⇒ Cellules

A partir des cumuls horaires de précipitation (seuil=10mm/h)



## 2. Suivi ⇒ Trajectoires - - -

Conditions de recouvrement et de corrélation entre cellules

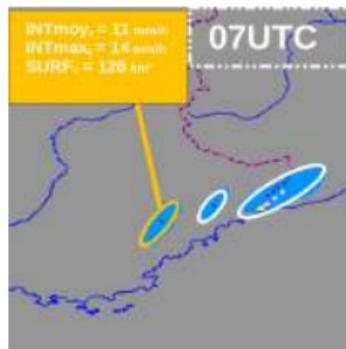


# L'approche lagrangienne (ou objet) pour l'étude des pluies extrêmes

- Outil de détection et de suivi des systèmes précipitants (OSIRIS) (*Morel et Senesi. 2002, Brousseau et al. 2016*)

## 1. Détection ⇒ Cellules

A partir des cumuls horaires de précipitation (seuil=10mm/h)



## 2. Suivi ⇒ Trajectoires - - -

Conditions de recouvrement et de corrélation entre cellules

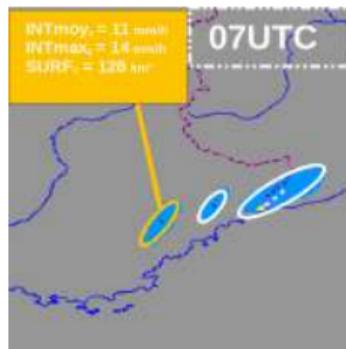


# L'approche lagrangienne (ou objet) pour l'étude des pluies extrêmes

- Outil de détection et de suivi des systèmes précipitants (OSIRIS) (*Morel et Senesi. 2002, Brousseau et al. 2016*)

## 1. Détection ⇒ Cellules

A partir des cumuls horaires de précipitation (seuil=10mm/h)



## 2. Suivi ⇒ Trajectoires - - -

Conditions de recouvrement et de corrélation entre cellules

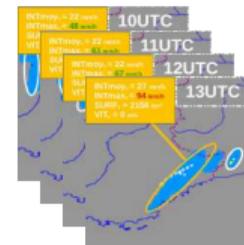


## 3. Caractéristiques

Pour chaque système précipitant détecté et suivi

- Durée
- Intensité
- Surface
- Volume
- Vitesse
- Sévérité

Un ensemble de cellules (c)

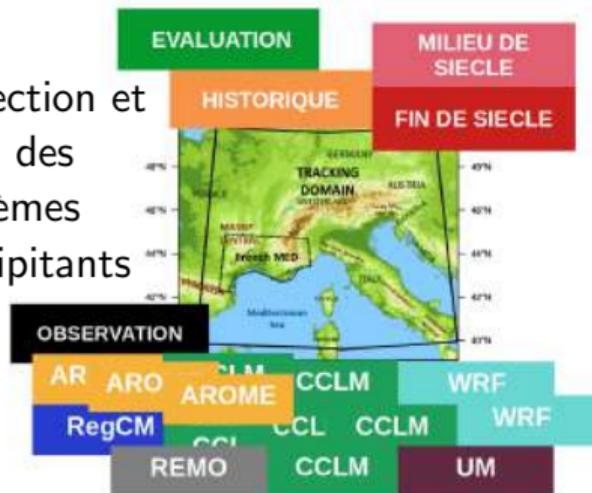


# La combinaison des approches ensembliste et objet

- Approche lagrangienne (objet) appliquée à l'ensemble des simulations du FPS Convection

## Les différentes périodes

Détection et suivi des systèmes précipitants

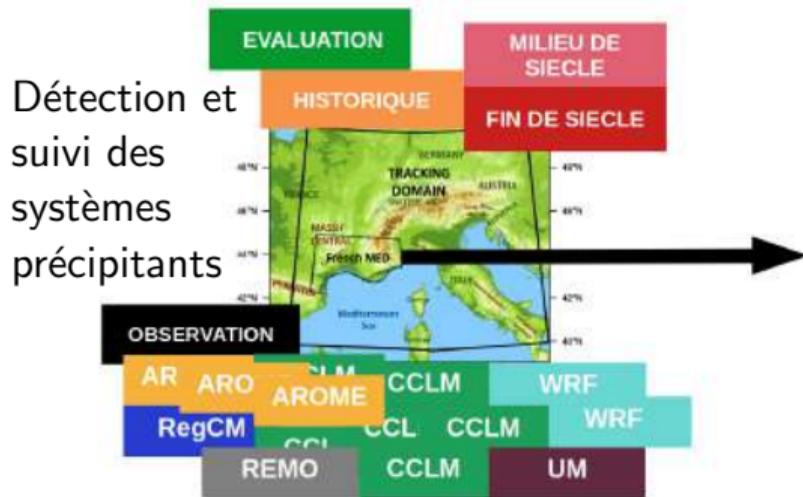


L'ensemble du FPS Convection  
(14 simulations)

# La combinaison des approches ensembliste et objet

- Approche lagrangienne (objet) appliquée à l'ensemble des simulations du FPS Convection

## Les différentes périodes



L'ensemble du FPS Convection  
(14 simulations)

## Focus sur les épisodes méditerranéens français

- 1 Définition de zone 
- 2 Sélection des systèmes
  - critères temporel (SOND) et spatial
  - fortes précipitations >10 mm/h et >100 mm/j

# Plan de la présentation

1 Introduction

2 Méthodologie

- La nouvelle génération de modèle de climat à résolution kilométrique
- L'approche objet appliquée aux pluies extrêmes

3 Evaluation pour la simulation des épisodes méditerranéens

4 Evolution future des épisodes méditerranéens

5 Conclusion sur les épisodes méditerranéens

6 Autres applications : quelques exemples

**① EVALUATION = évaluer la performance du modèle**

**Simulations EVALUATION forcées par des réanalyses**

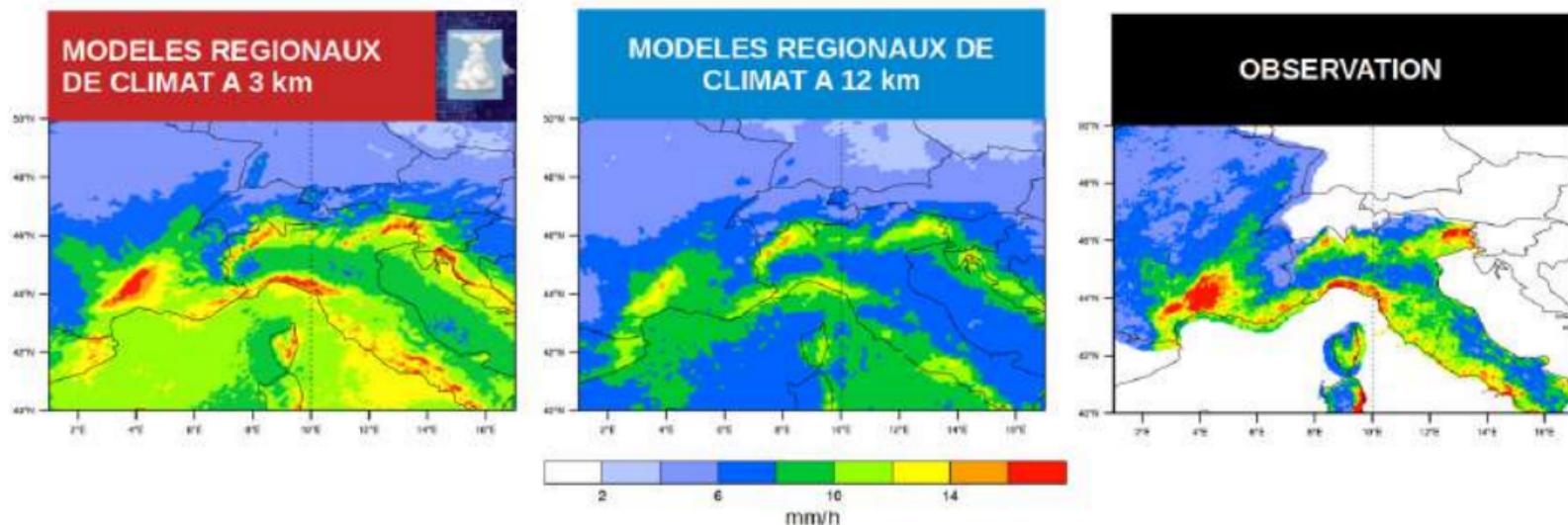


**OBSERVATION de référence**

# Approche eulérienne : moyenne de l'ensemble



## Extrêmes horaires de précipitation de l'automne (Complément à Ban, Caillaud et al. 2021)



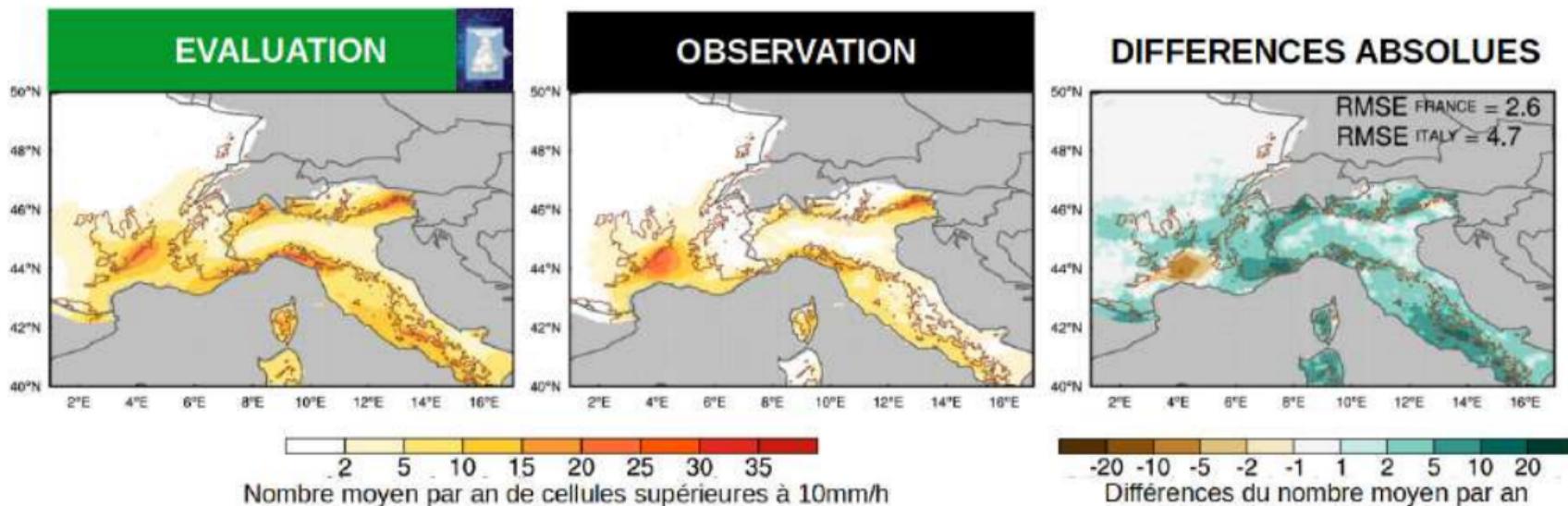
La nouvelle génération de modèles de climat à résolution kilométrique :

- représente correctement les zones touchées par les épisodes méditerranéens et les intensités des extrêmes horaires de précipitation
- apporte de la valeur ajoutée par rapport aux modèles à 12 km

# Approche lagrangienne : Distribution spatiale



## Densités de trajectoires en automne

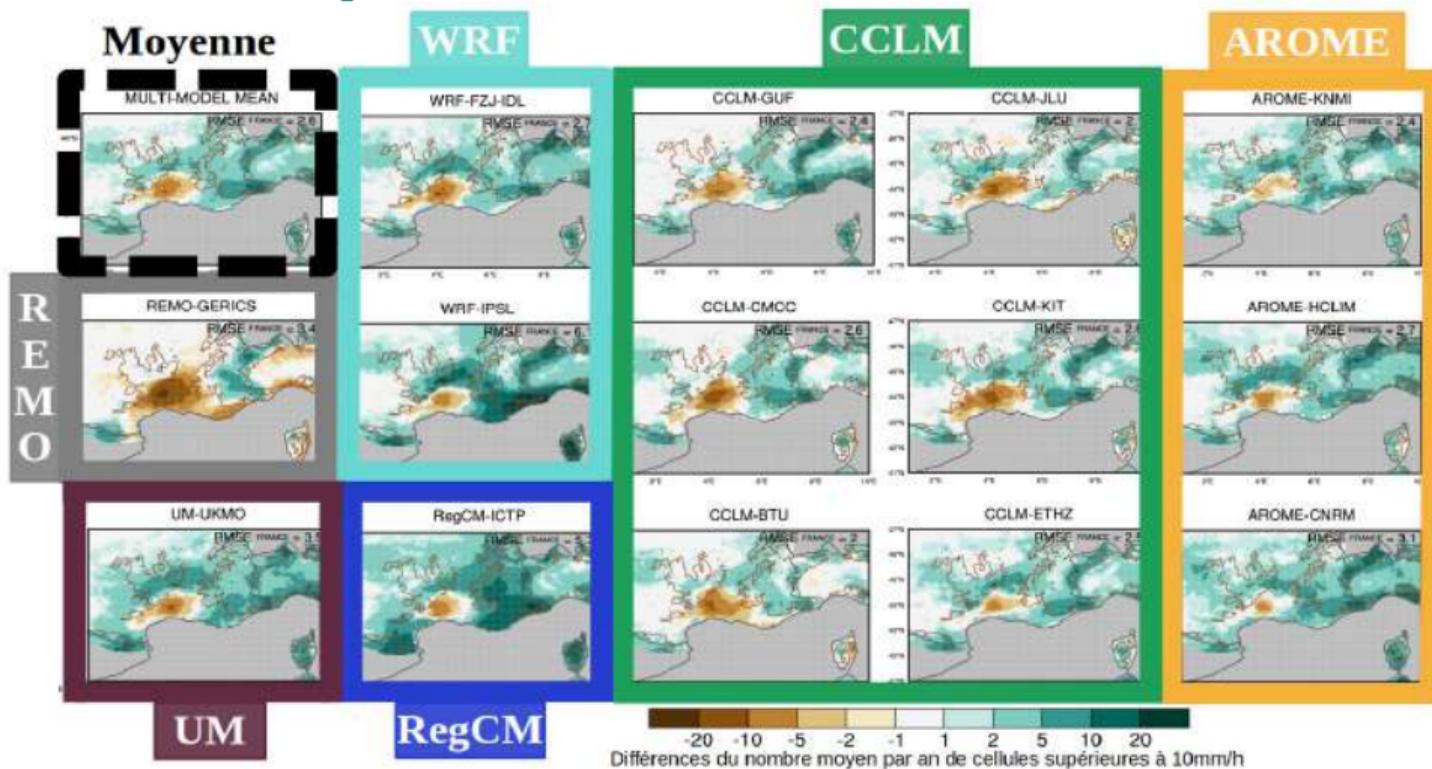


- Bonne représentation des zones touchées par les épisodes méditerranéens
- Surestimation sur le relief et sur le sud de l'Italie (qualité des observations?)
- Sous-estimation sur les plaines du sud-est de la France



# Approche lagrangienne : Distribution spatiale - panel

## Densités de trajectoires en automne

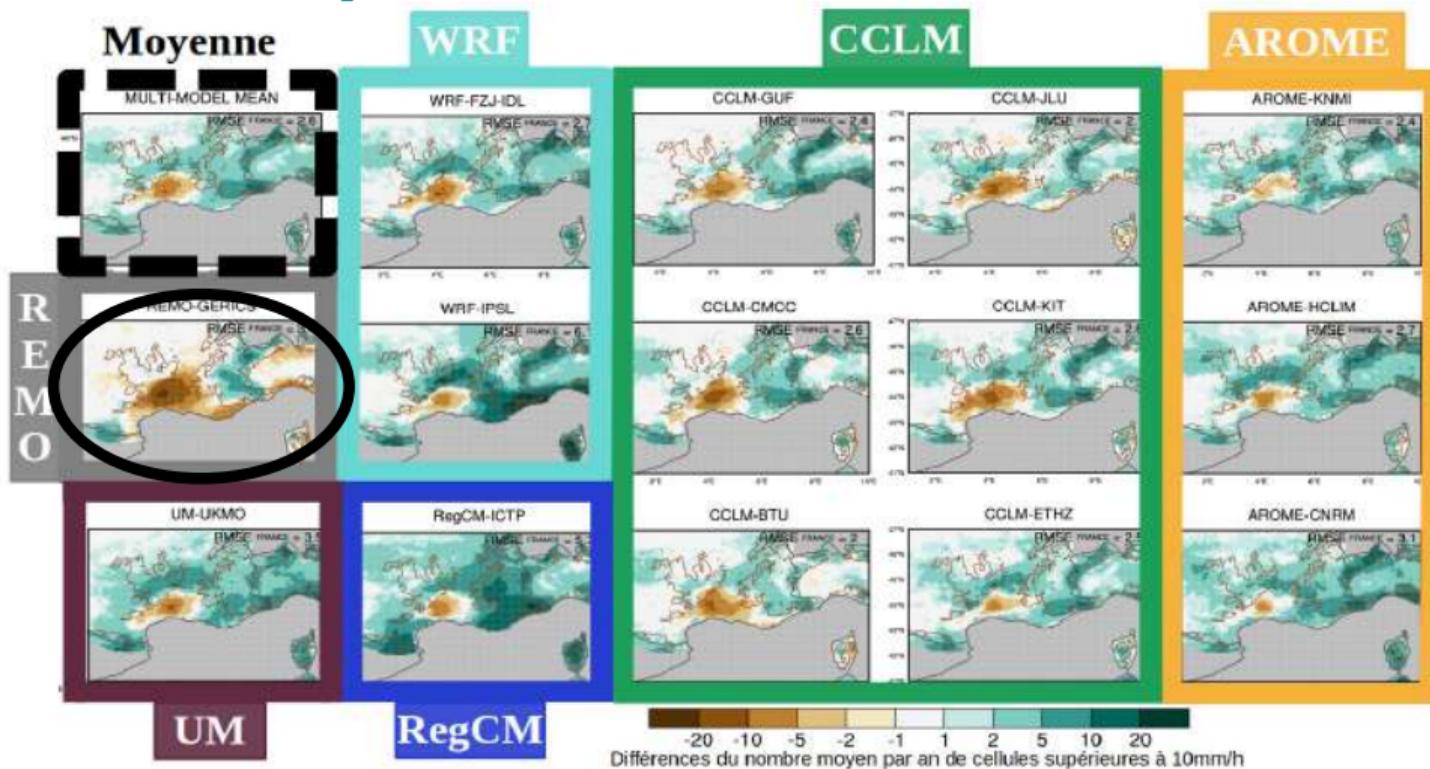


- Des différences pouvant être importantes suivant les simulations
- Des comportements proches pour certaines familles de modèle



# Approche lagrangienne : Distribution spatiale - panel

## Densités de trajectoires en automne

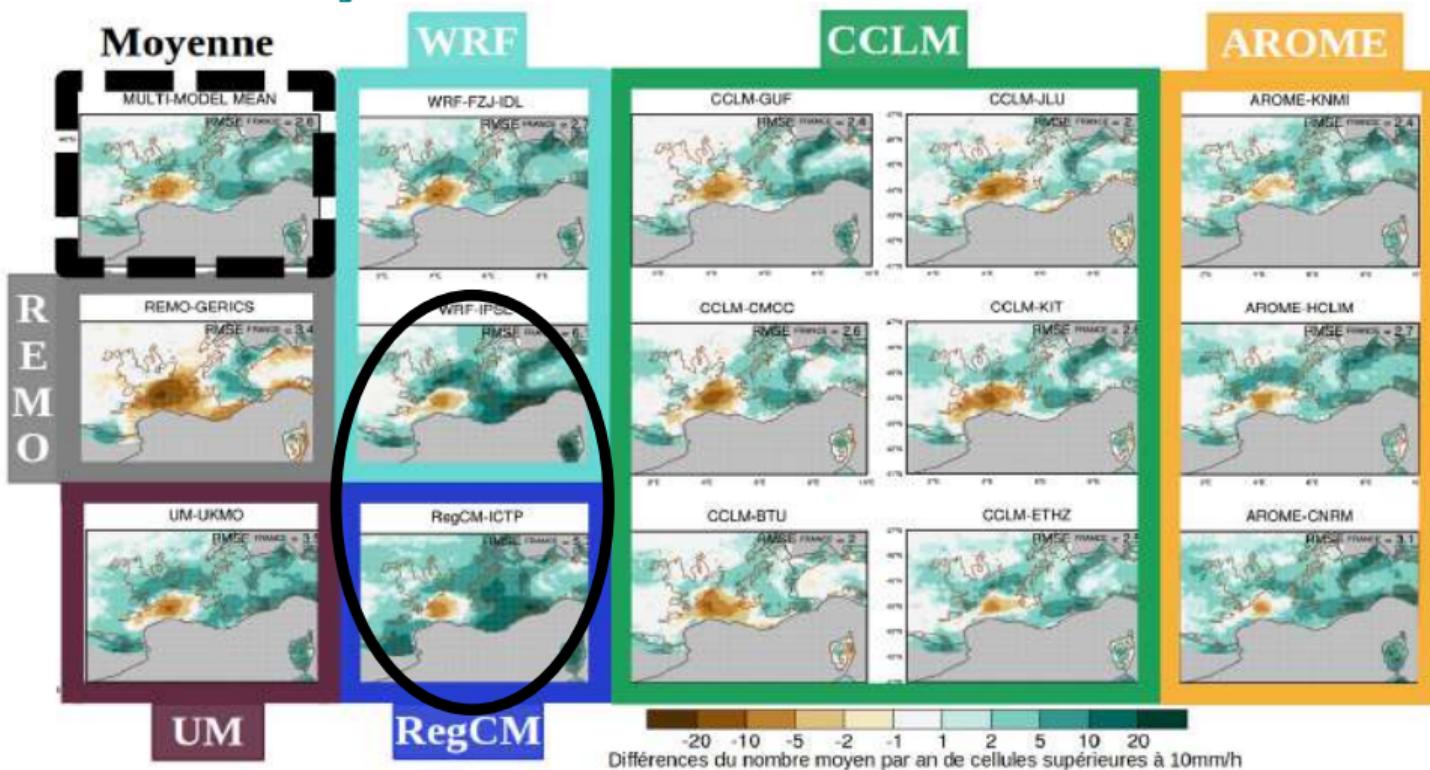


- Des différences pouvant être importantes suivant les simulations
- Des comportements proches pour certaines familles de modèle



# Approche lagrangienne : Distribution spatiale - panel

## Densités de trajectoires en automne

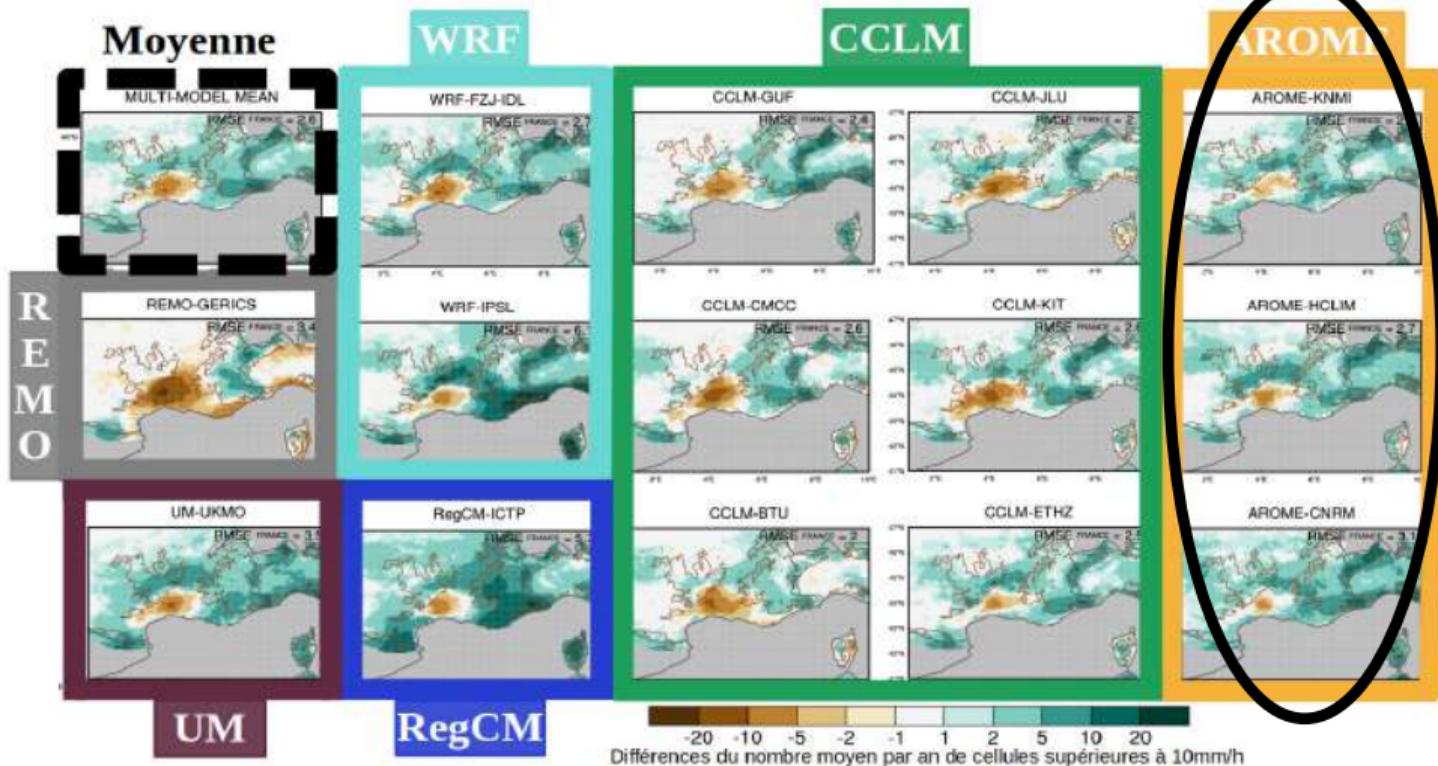


- Des différences pouvant être importantes suivant les simulations
- Des comportements proches pour certaines familles de modèle



# Approche lagrangienne : Distribution spatiale - panel

## Densités de trajectoires en automne



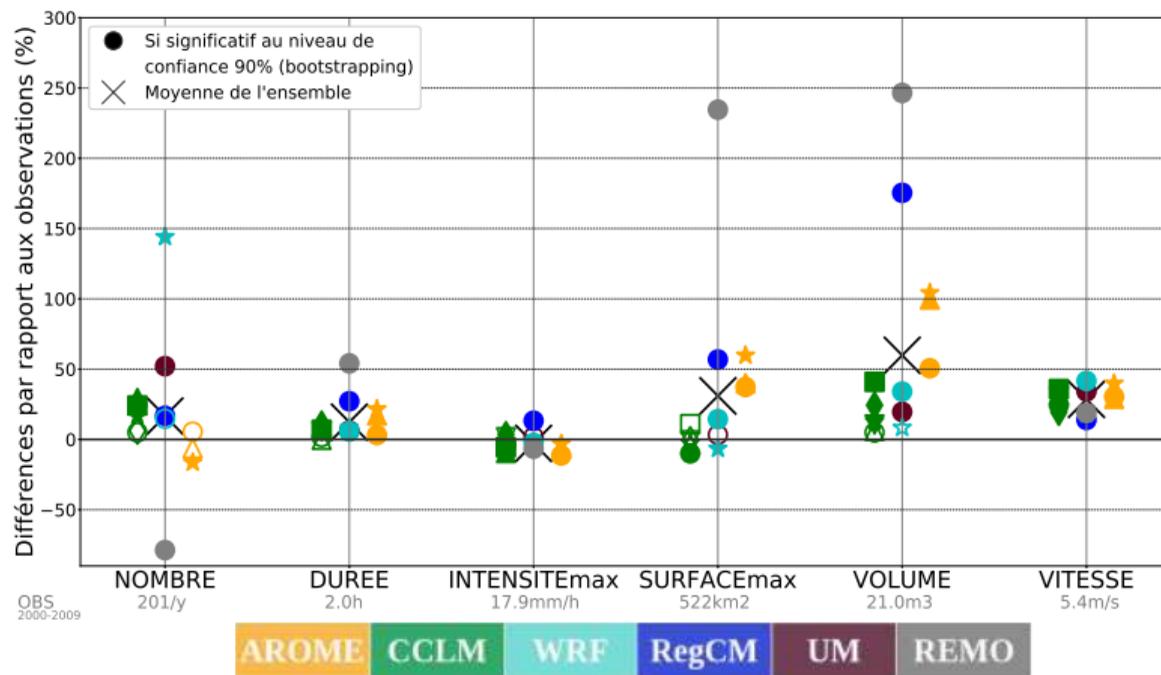
- Des différences pouvant être importantes suivant les simulations
- Des comportements proches pour certaines familles de modèle

# Approche lagrangienne :

## Focus sur les épisodes méditerranéens français



### Différences relatives des caractéristiques / Observations



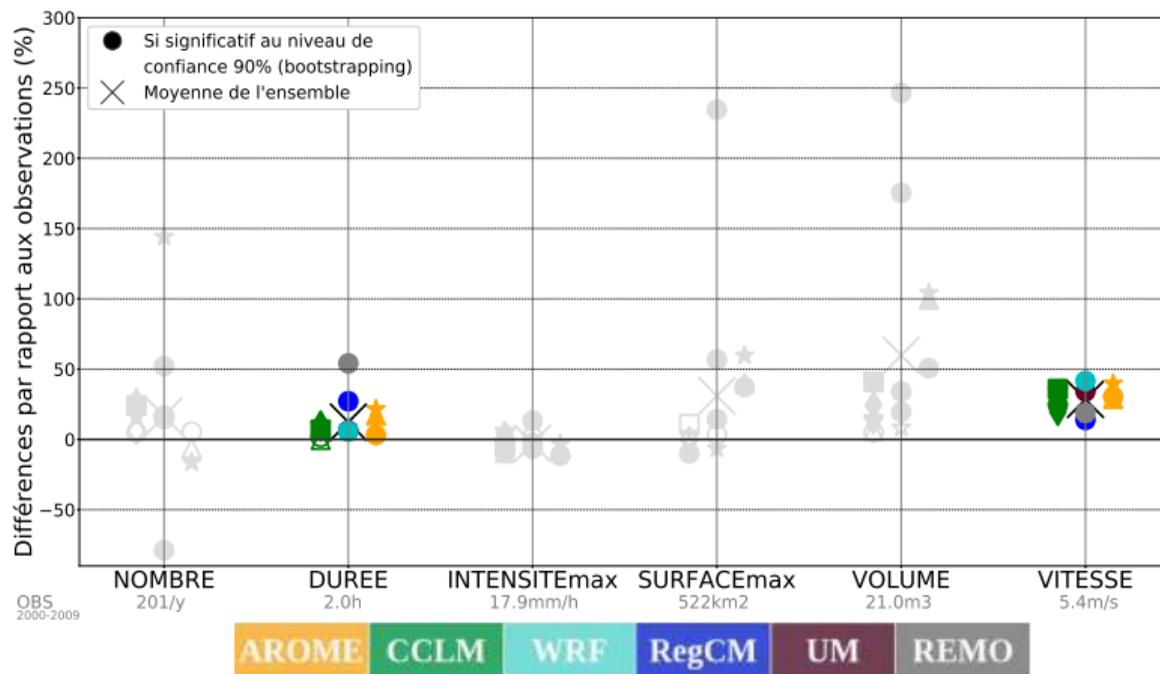
- Représentation correcte des principales caractéristiques des épisodes méditerranéens pour la plupart des simulations
- Des comportements proches par famille de modèle
- Des différences plus marquées pour certaines simulations

# Approche lagrangienne :

## Focus sur les épisodes méditerranéens français



### Différences relatives des caractéristiques / Observations



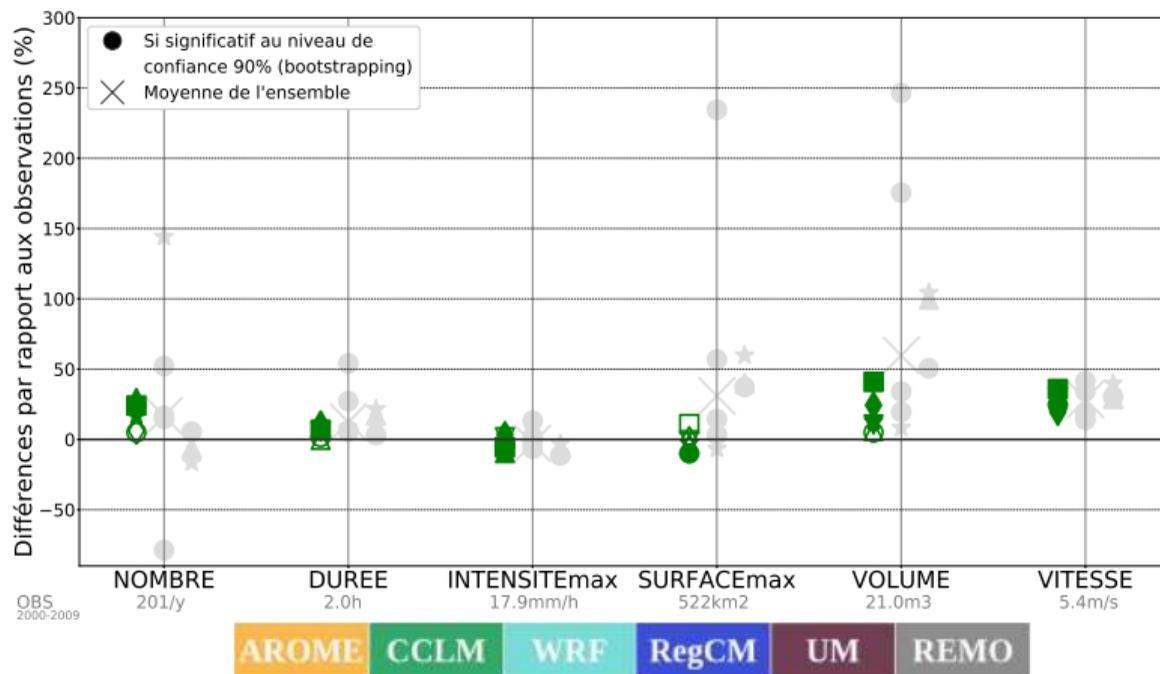
- Représentation correcte des principales caractéristiques des épisodes méditerranéens pour la plupart des simulations
- Des comportements proches par famille de modèle
- Des différences plus marquées pour certaines simulations

# Approche lagrangienne :

## Focus sur les épisodes méditerranéens français



### Différences relatives des caractéristiques / Observations



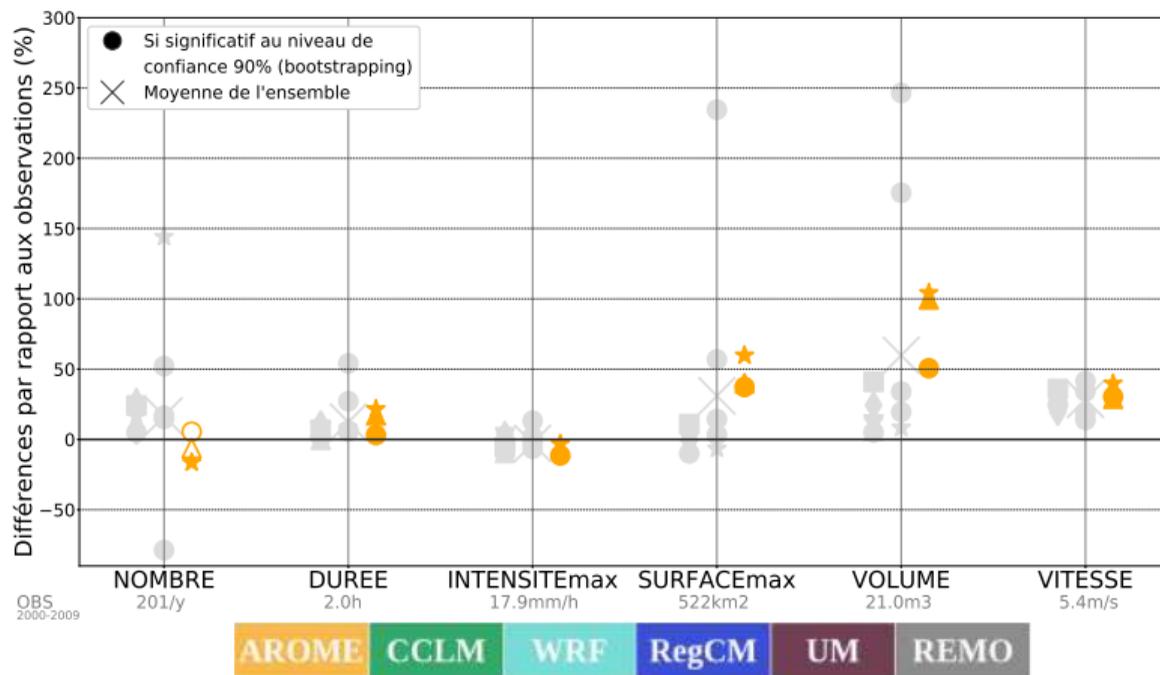
- Représentation correcte des principales caractéristiques des épisodes méditerranéens pour la plupart des simulations
- Des comportements proches par famille de modèle
- Des différences plus marquées pour certaines simulations

# Approche lagrangienne :

## Focus sur les épisodes méditerranéens français



### Différences relatives des caractéristiques / Observations



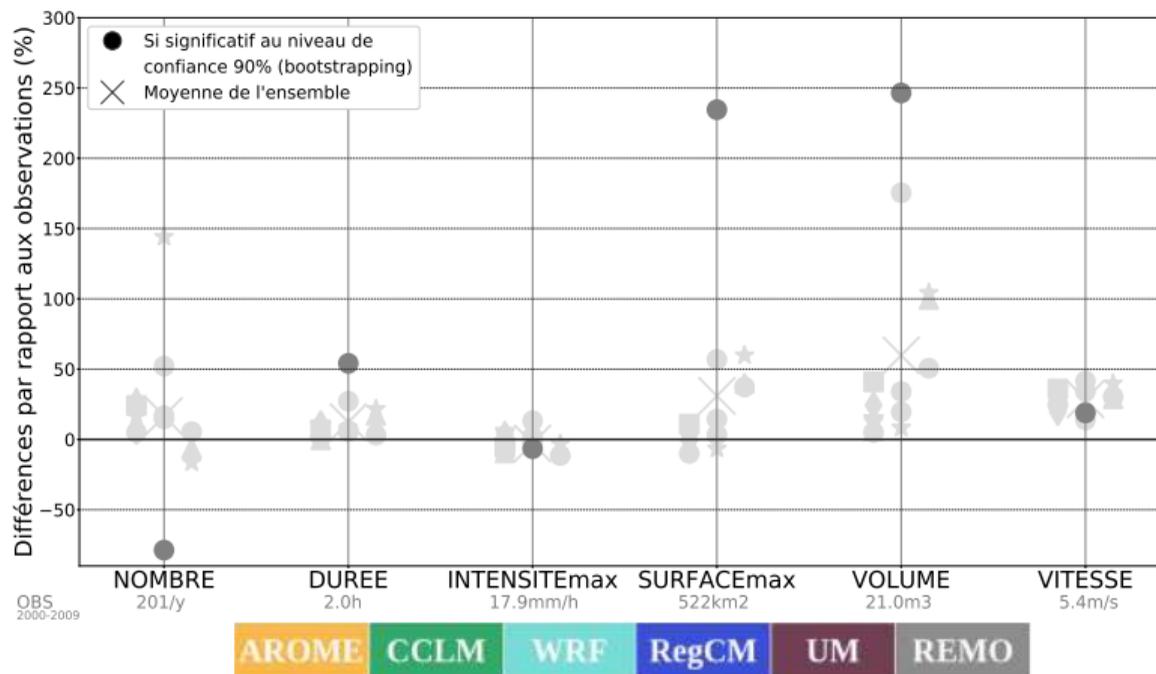
- Représentation correcte des principales caractéristiques des épisodes méditerranéens pour la plupart des simulations
- Des comportements proches par famille de modèle
- Des différences plus marquées pour certaines simulations

# Approche lagrangienne :

## Focus sur les épisodes méditerranéens français



### Différences relatives des caractéristiques / Observations



- Représentation correcte des principales caractéristiques des épisodes méditerranéens pour la plupart des simulations
- Des comportements proches par famille de modèle
- Des différences plus marquées pour certaines simulations

# Evaluation des modèles de climat à résolution kilométrique pour la simulation des épisodes méditerranéens

## Synthèse

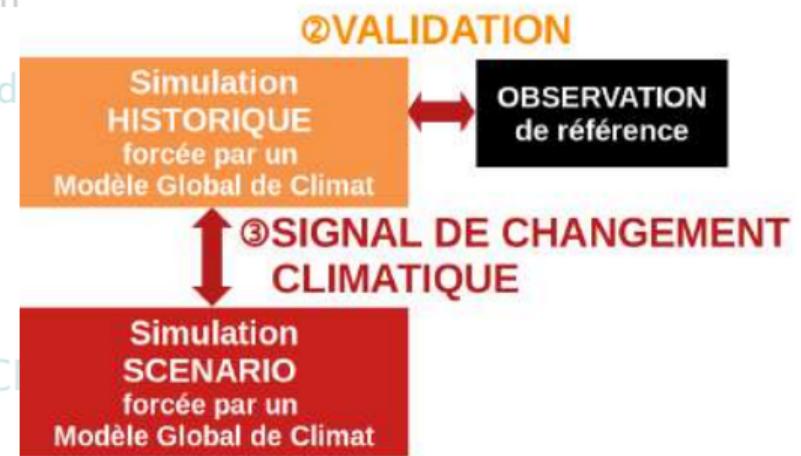
Outils de modélisation adaptés pour l'étude des épisodes méditerranéens

- Valeur ajoutée de la nouvelle génération de modèle de climat (2–3 km) par rapport aux modèles à 12 km (*Caillaud et al. 2021, Ban et al. 2021, Pichelli et al. 2021, Caillaud 2023*)
- Bonne représentation des principales caractéristiques des systèmes français pour la plupart des simulations
- Des différences par rapport aux données observées présentes dans toutes les simulations, par famille de modèle ou par modèle

Exemple pour AROME : meilleure représentation spatiale, surestimation des surfaces et volumes, sous-estimation des intensités maximales (*Caillaud et al. 2021*)

# Plan de la présentation

- 1 Introduction
- 2 Méthodologie
  - La nouvelle génération de modèle de climat à résolution kilométrique
  - L'approche objet appliquée aux pluies extrêmes
- 3 Evaluation pour la simulation des épisodes méditerranéens
- 4 Evolution future des épisodes méditerranéens
- 5 Conclusion sur les épisodes méditerranéens
- 6 Autres applications : quelques exemples avec C...



# Validation des simulations historiques



- Bonne représentation des zones et des principales caractéristiques des épisodes méditerranéens pour la plupart des simulations malgré quelques limitations
  - Des similitudes fortes dans le comportement des simulations EVALUATION et HISTORIQUE
- ⇒ Certains biais seraient des biais intrinsèques au modèle

# Validation des simulations historiques

## ②VALIDATION

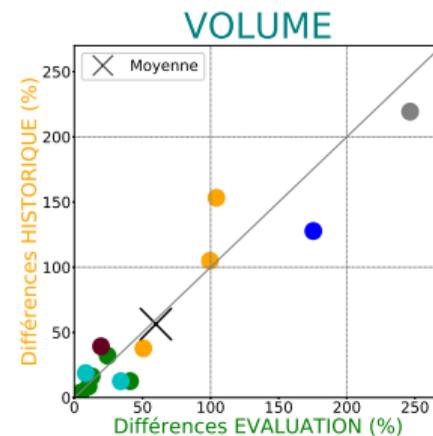
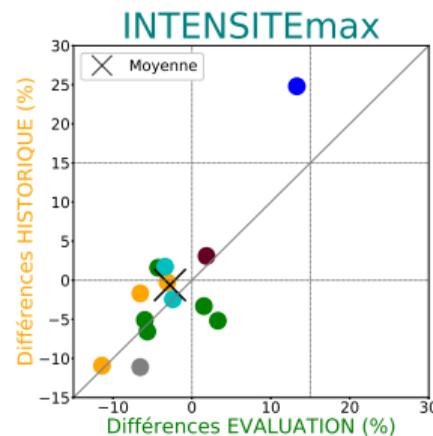
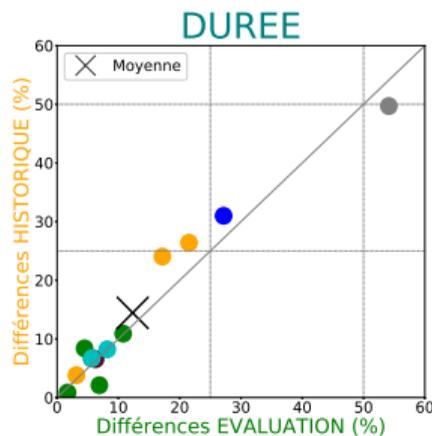
Simulations HISTORIQUE  
forcées par des  
Modèles Globaux de Climat



OBSERVATION  
de référence

- Bonne représentation des zones et des principales caractéristiques des épisodes méditerranéens pour la plupart des simulations malgré quelques limitations
- Des similitudes fortes dans le comportement des simulations EVALUATION et HISTORIQUE

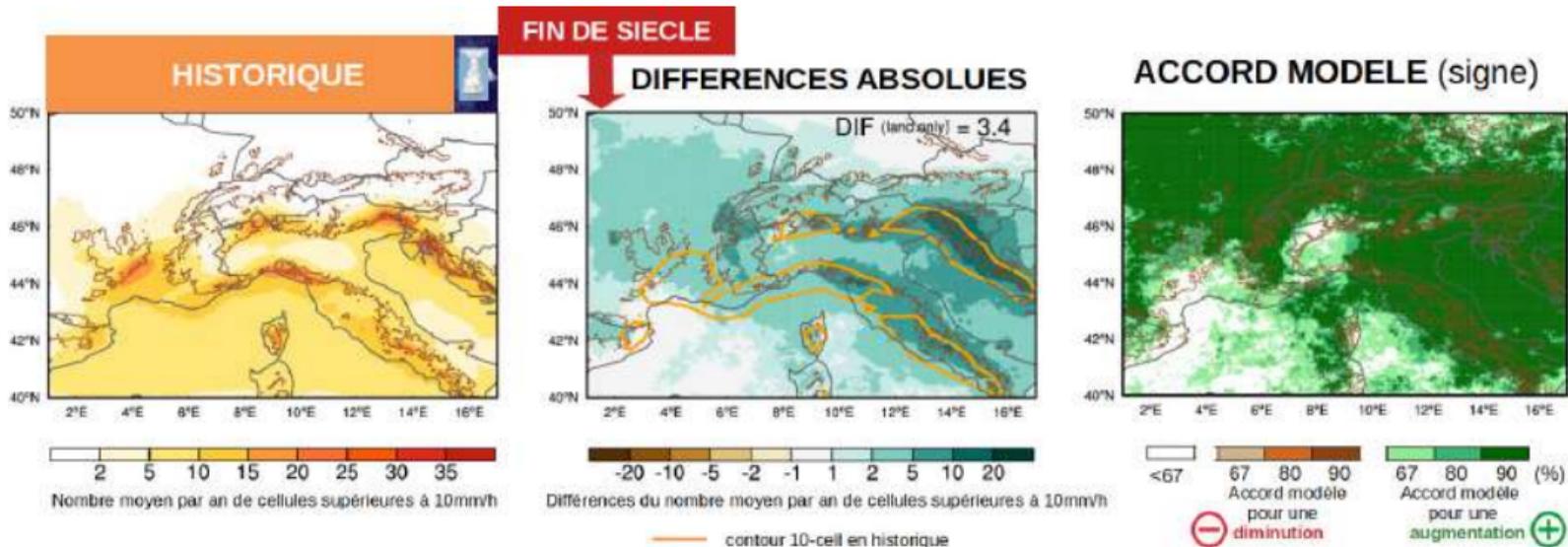
⇒ Certains biais seraient des biais intrinsèques au modèle





# Projections : Distribution spatiale

## Changement de densité de trajectoires en automne

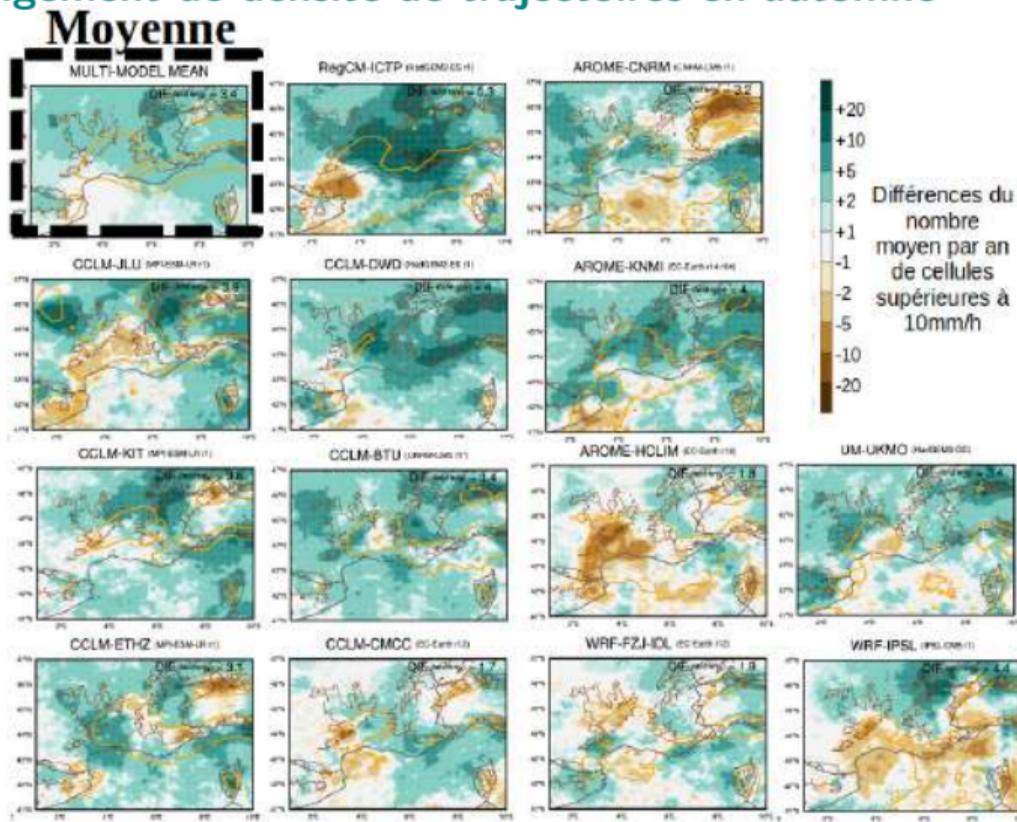


- Augmentation de la fréquence des systèmes fortement précipitants sur une grande partie du domaine pan-alpin avec un très bon accord de signe des modèles sur 71 % du domaine terrestre
- Doublement des zones touchées sur le domaine pan-alpin
- Pas d'accord clair dans le sud-est de la France



# Projections : Distribution spatiale - panel

## Changement de densité de trajectoires en automne

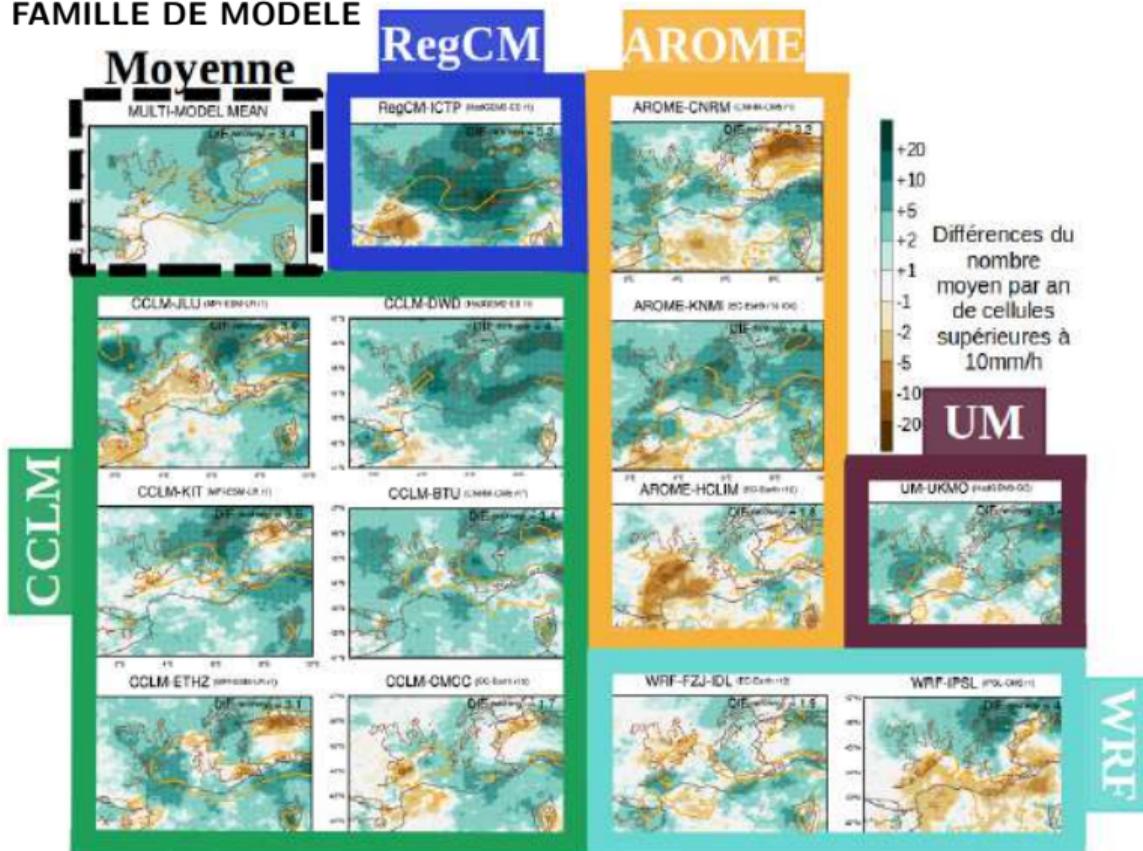


- Des différences au sein des familles de modèle
  - Des comportements proches pour les simulations forcées par le même modèle global de climat
- ⇒ Les changements de fréquence sont pilotés par les changements de situations synoptiques favorables imposés par les modèles globaux de climat forceurs



# Projections : Distribution spatiale - panel

PAR FAMILLE DE MODELE



- Des différences au sein des familles de modèle

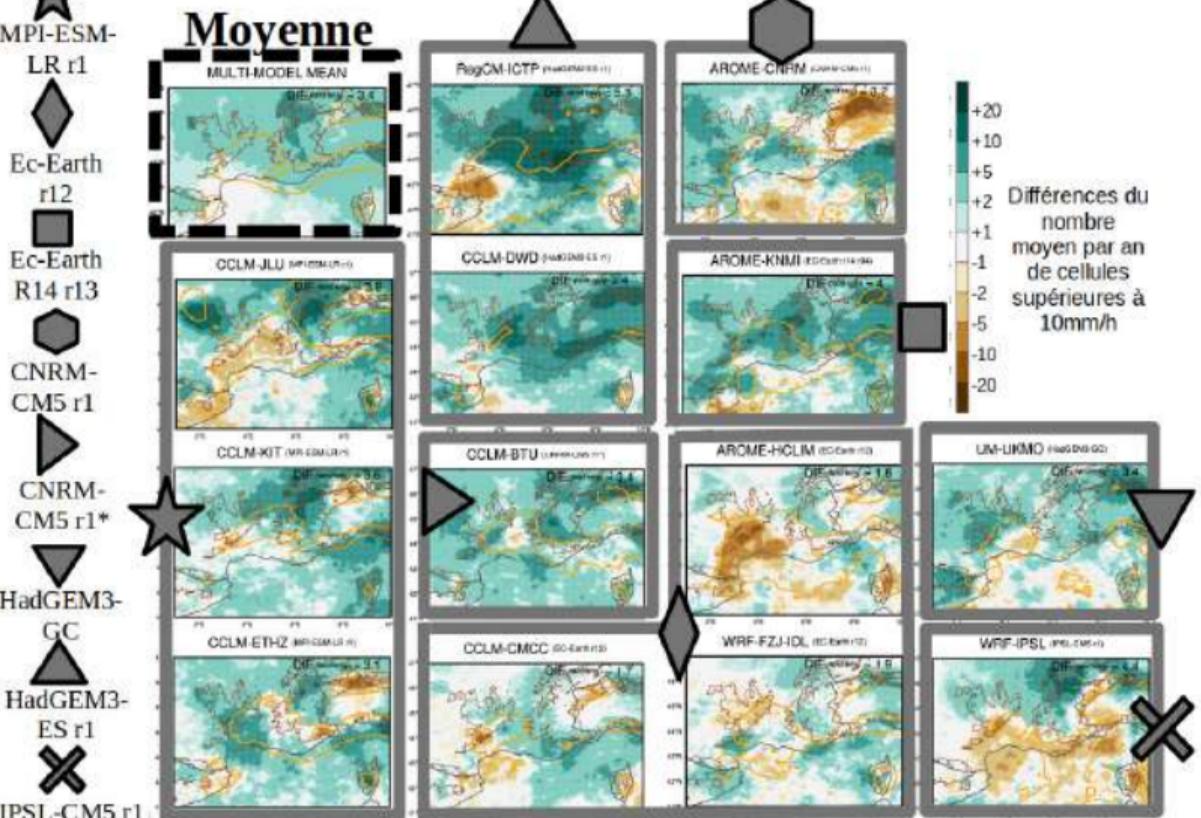
- Des comportements proches pour les simulations forcées par le même modèle global de climat

⇒ Les changements de fréquence sont pilotés par les changements de situations synoptiques favorables imposés par les modèles globaux de climat forcés



# Projections : Distribution spatiale - panel

★ PAR MODELE GLOBAL DE CLIMAT FORCEUR



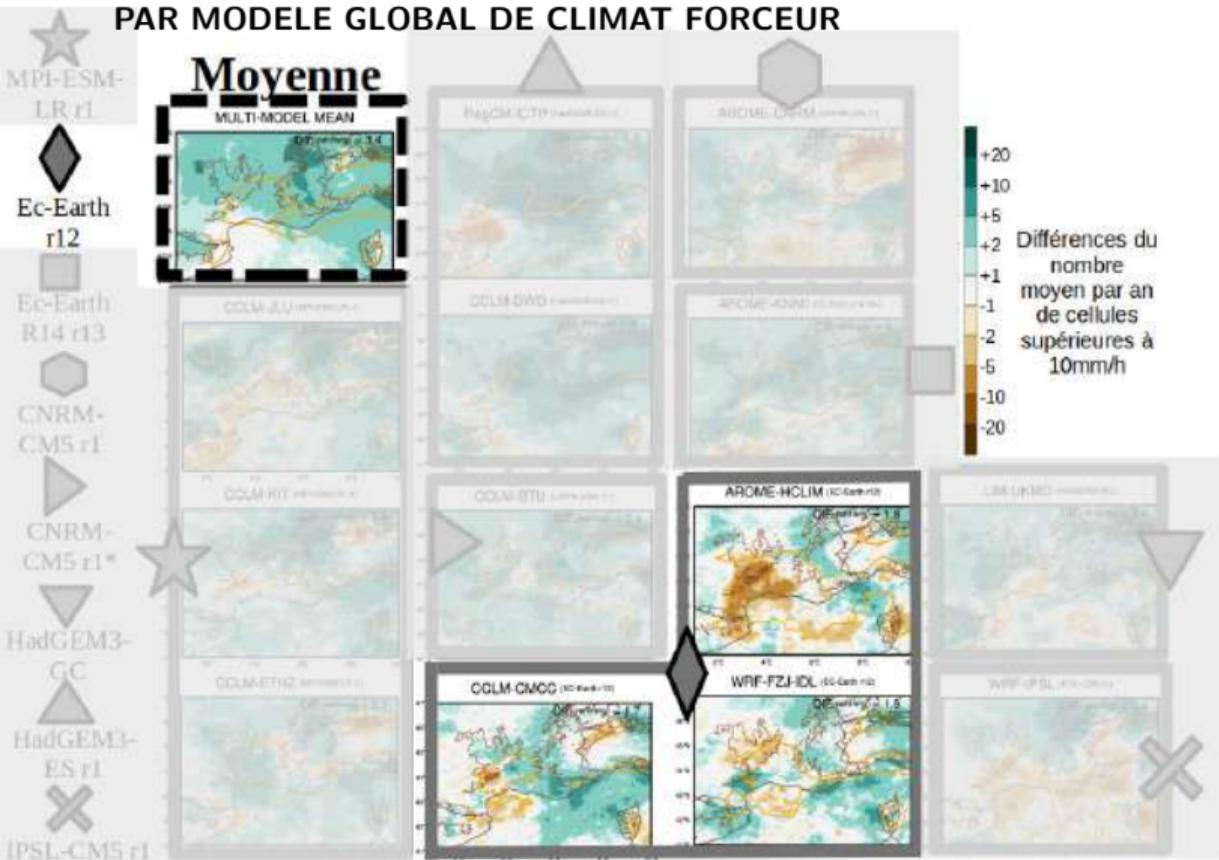
- Des différences au sein des familles de modèle
- Des comportements proches pour les simulations forcées par le même modèle global de climat

⇒ Les changements de fréquence sont pilotés par les changements de situations synoptiques favorables imposés par les modèles globaux de climat forcés



# Projections : Distribution spatiale - panel

## PAR MODELE GLOBAL DE CLIMAT FORCEUR



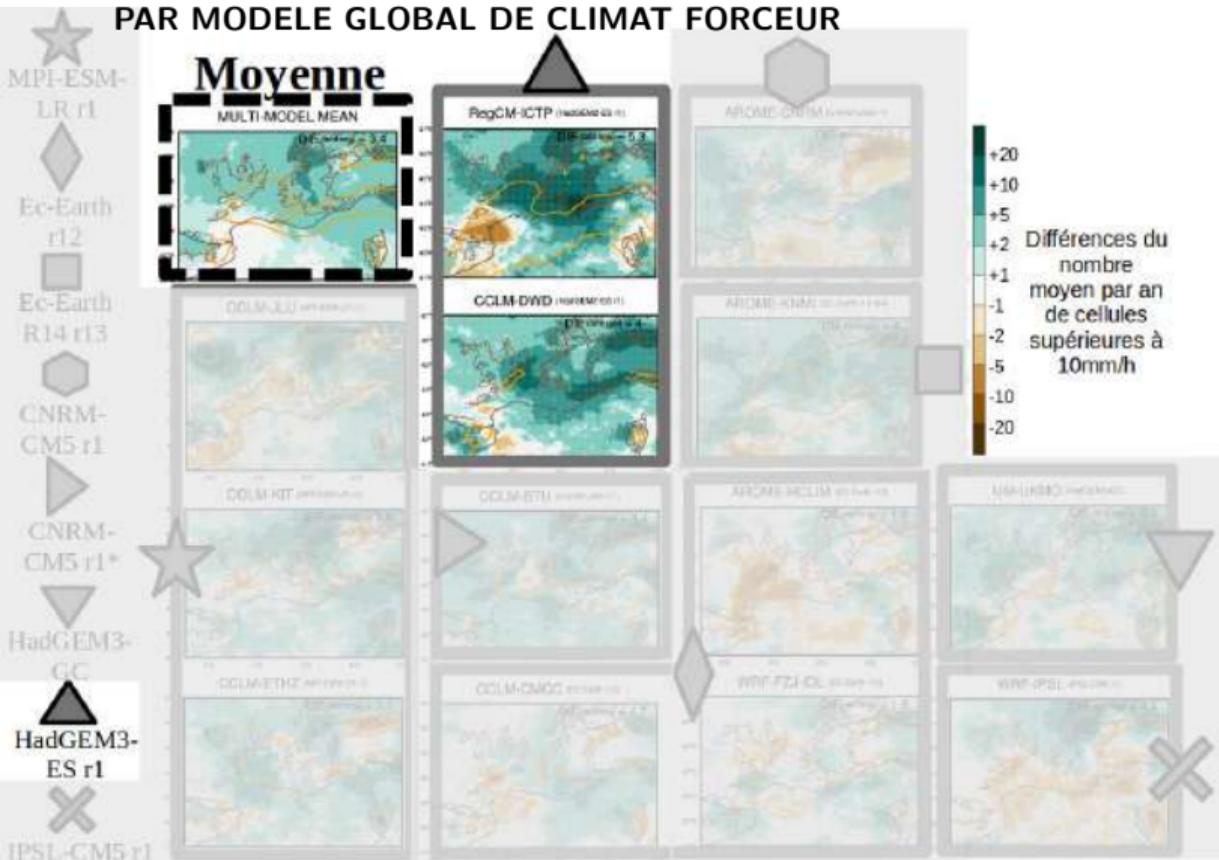
- Des différences au sein des familles de modèle
- Des comportements proches pour les simulations forcées par le même modèle global de climat

⇒ Les changements de fréquence sont pilotés par les changements de situations synoptiques favorables imposés par les modèles globaux de climat forceurs



# Projections : Distribution spatiale - panel

## PAR MODELE GLOBAL DE CLIMAT FORCEUR



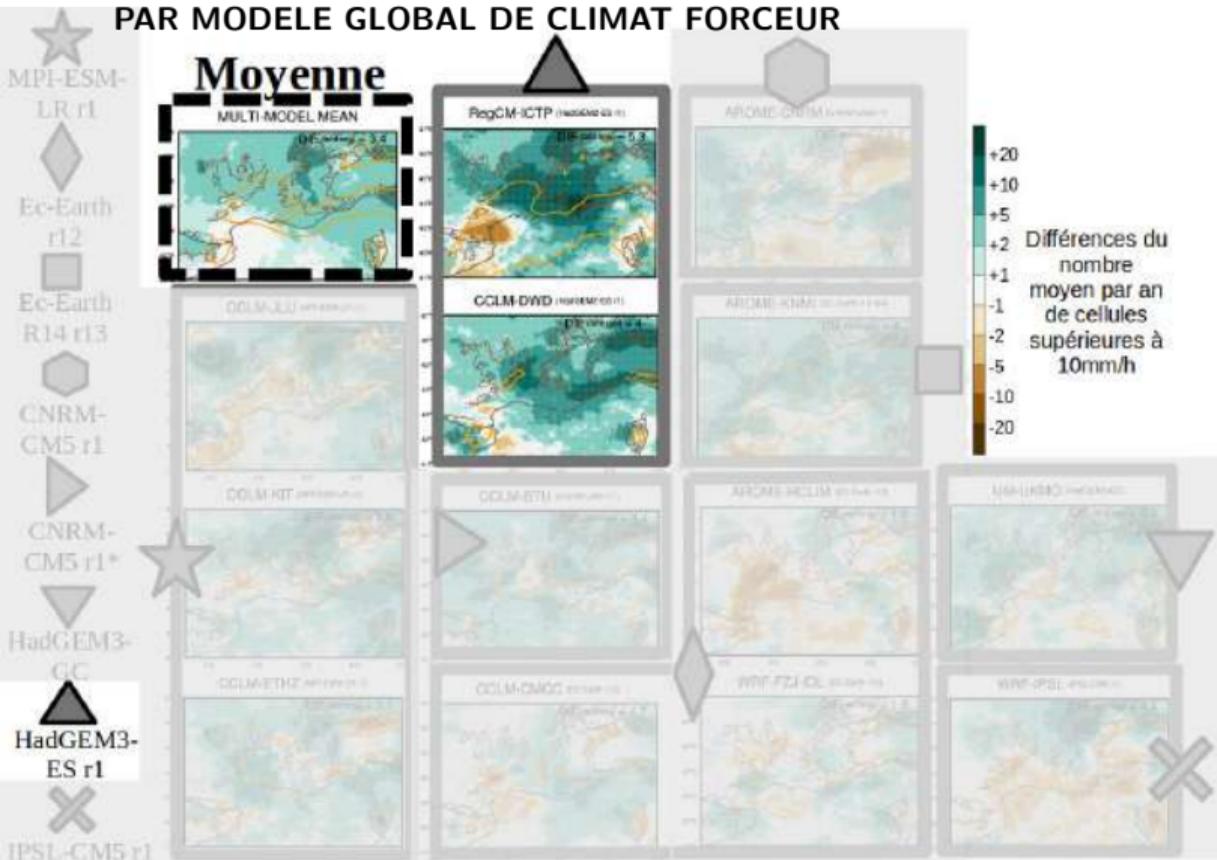
- Des différences au sein des familles de modèle
- Des comportements proches pour les simulations forcées par le même modèle global de climat

⇒ Les changements de fréquence sont pilotés par les changements de situations synoptiques favorables imposés par les modèles globaux de climat forceurs



# Projections : Distribution spatiale - panel

## PAR MODELE GLOBAL DE CLIMAT FORCEUR



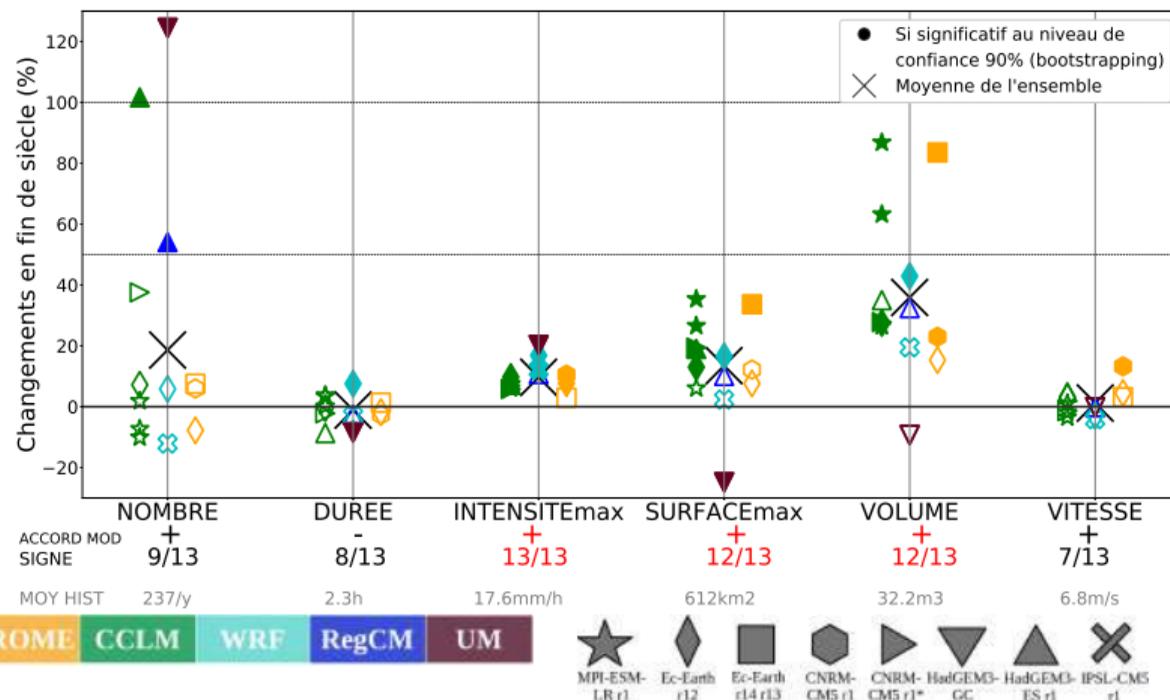
- Des différences au sein des familles de modèle
- Des comportements proches pour les simulations forcées par le même modèle global de climat

⇒ Les changements de fréquence sont pilotés par les changements de situations synoptiques favorables imposés par les modèles globaux de climat forceurs

# Approche lagrangienne : Focus sur les épisodes méditerranéens français



## Changements relatifs des caractéristiques en fin de siècle

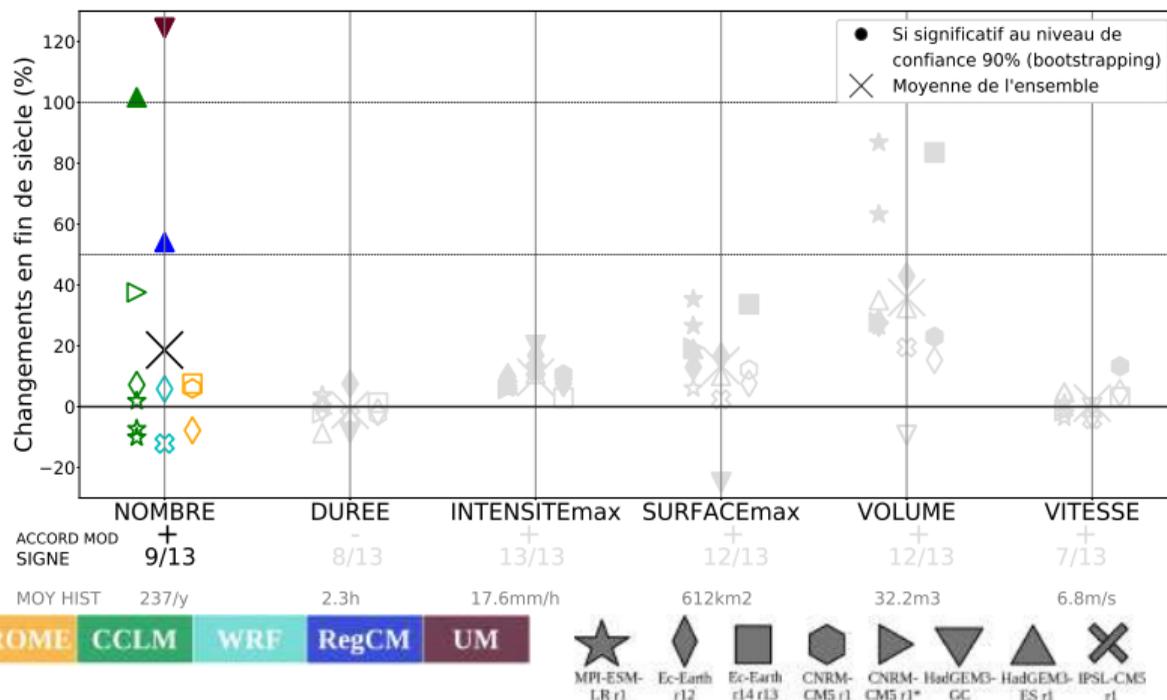


- Pas de changement attendu pour la durée et la vitesse de propagation
- Accord total pour une augmentation des intensités maximales : +3 à +20 %
- Bon accord pour une augmentation des surfaces et des volumes
- Changements différents, mais plausibles, proposés par une simulation

# Approche lagrangienne : Focus sur les épisodes méditerranéens français



## Changements relatifs des caractéristiques en fin de siècle

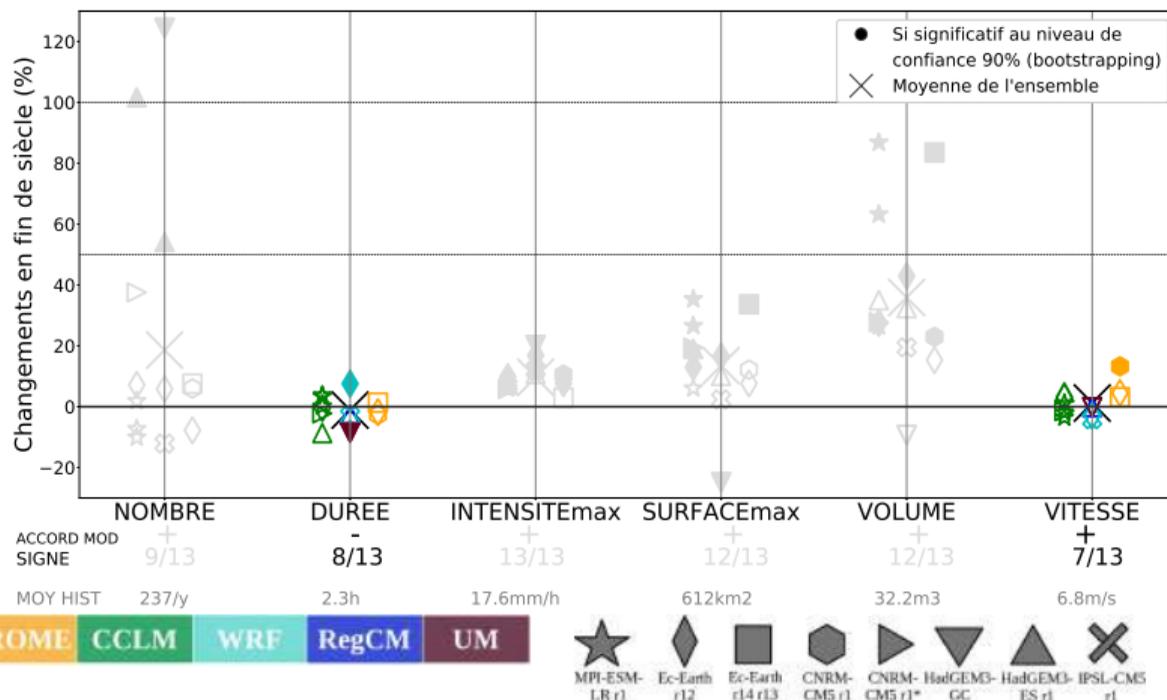


- Pas de changement attendu pour la durée et la vitesse de propagation
- Accord total pour une augmentation des intensités maximales : +3 à +20 %
- Bon accord pour une augmentation des surfaces et des volumes
- Changements différents, mais plausibles, proposés par une simulation

# Approche lagrangienne : Focus sur les épisodes méditerranéens français



## Changements relatifs des caractéristiques en fin de siècle

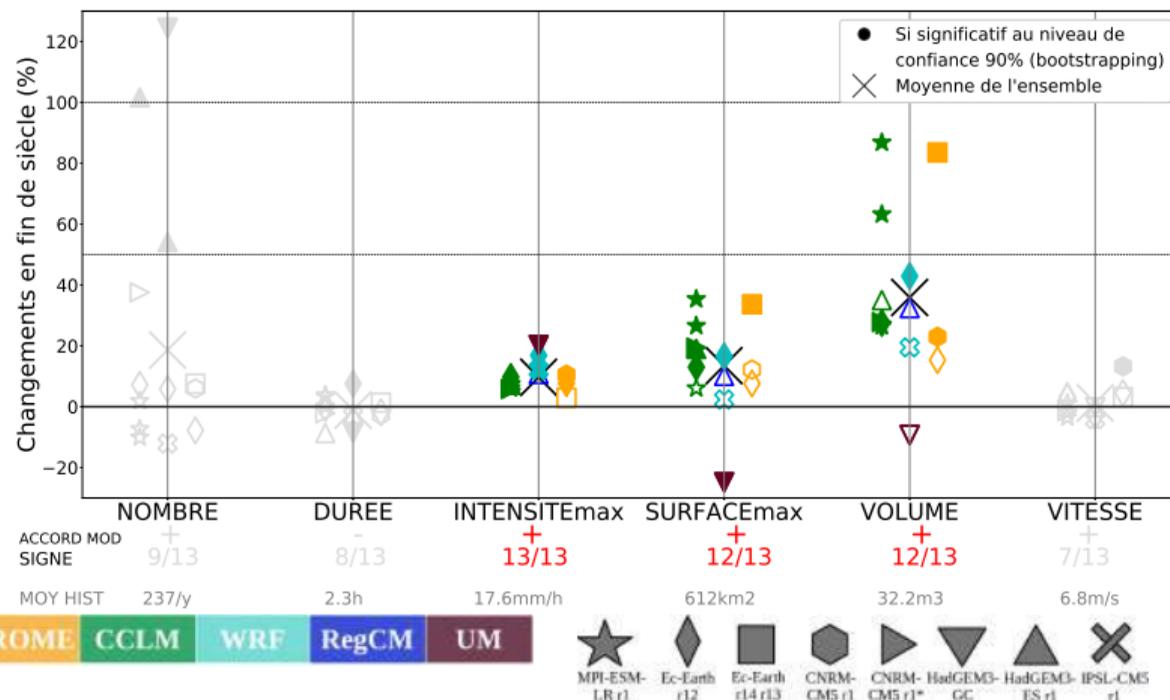


- Pas de changement attendu pour la durée et la vitesse de propagation
- Accord total pour une augmentation des intensités maximales : +3 à +20 %
- Bon accord pour une augmentation des surfaces et des volumes
- Changements différents, mais plausibles, proposés par une simulation

# Approche lagrangienne : Focus sur les épisodes méditerranéens français



## Changements relatifs des caractéristiques en fin de siècle

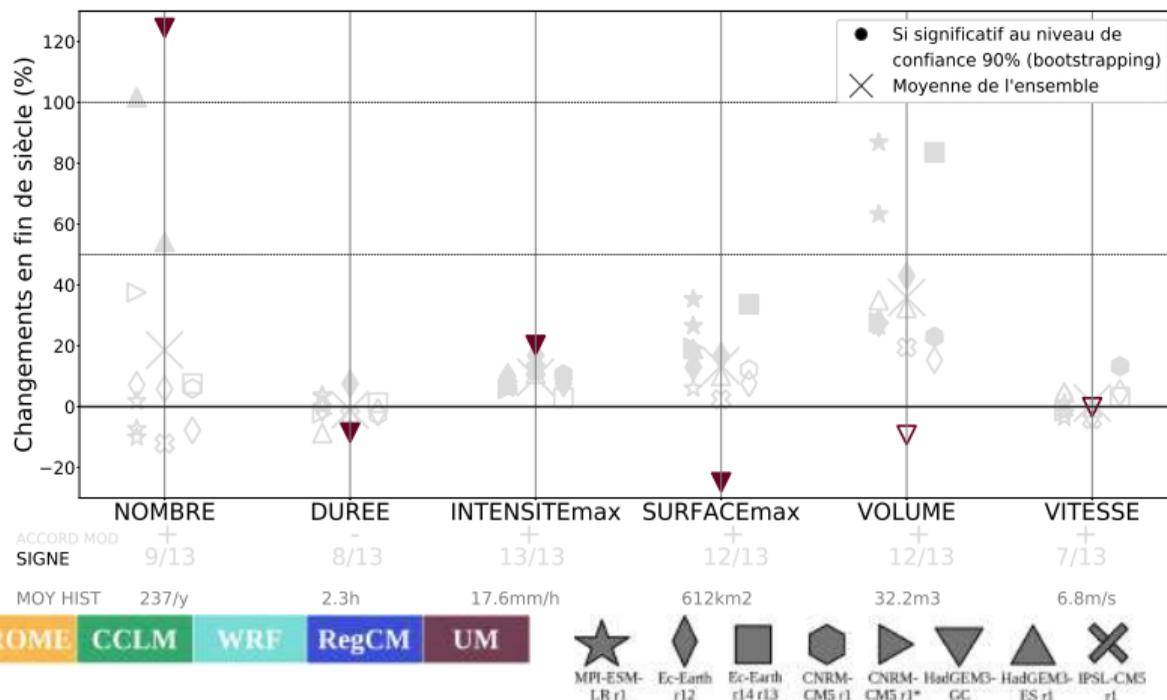


- Pas de changement attendu pour la durée et la vitesse de propagation
- Accord total pour une augmentation des intensités maximales : +3 à +20 %
- Bon accord pour une augmentation des surfaces et des volumes
- Changements différents, mais plausibles, proposés par une simulation

# Approche lagrangienne : Focus sur les épisodes méditerranéens français



## Changements relatifs des caractéristiques en fin de siècle



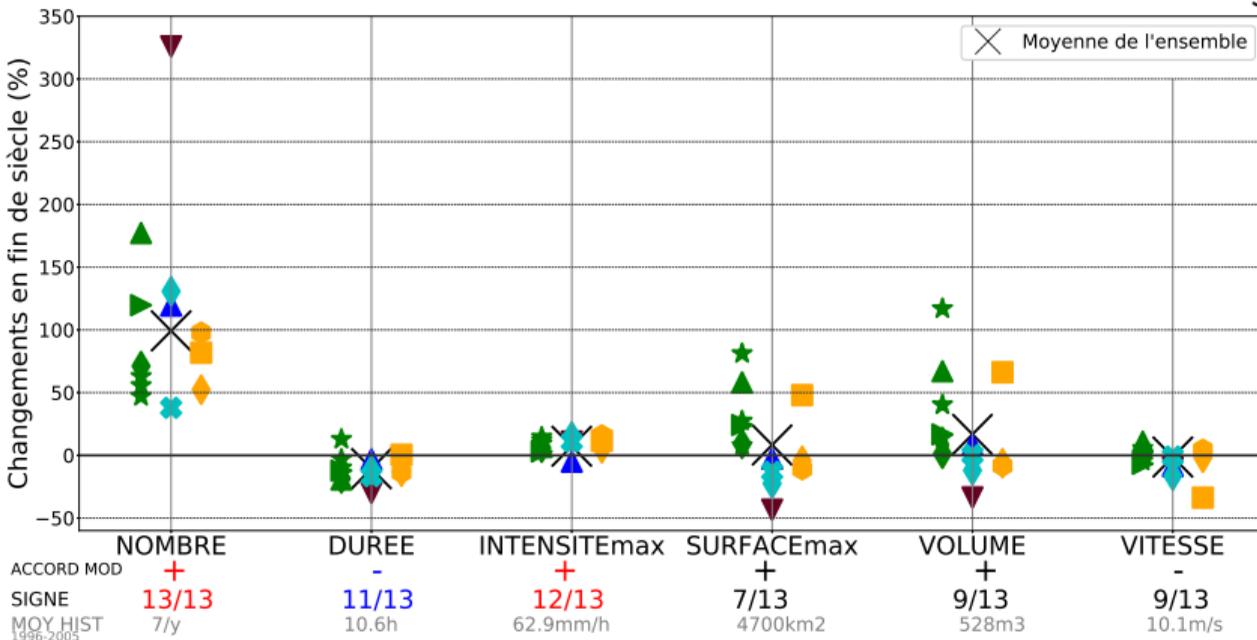
- Pas de changement attendu pour la durée et la vitesse de propagation
- Accord total pour une augmentation des intensités maximales : +3 à +20 %
- Bon accord pour une augmentation des surfaces et des volumes
- Changements différents, mais plausibles, proposés par une simulation

# Projections : Focus sur les épisodes méditerranéens français



## Changements relatifs des caractéristiques en fin de siècle (systèmes les plus intenses)

Seuil : p97% INTmax HISTORIQUE



- Accord total pour une augmentation de fréquence, mais large gamme de valeurs : +38 à +326 %
- Très bon accord pour des systèmes plus courts et plus intenses

AROME CCLM WRF RegCM UM

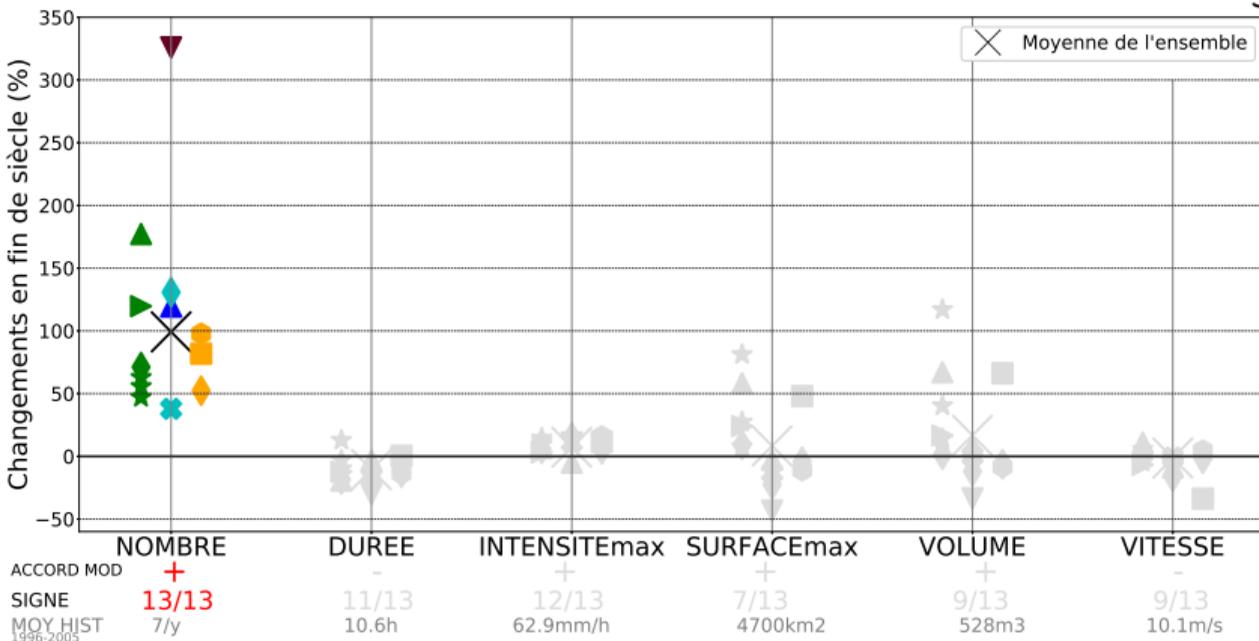
MPI-ESM-LR r1 Ec-Earth r12 Ec-Earth r14 r13 CNRM-CM5 r1 CNRM-CM5 r1\* HadGEM3-GC HadGEM3-ES r1 IPSL-CM5 r1

# Projections : Focus sur les épisodes méditerranéens français



## Changements relatifs des caractéristiques en fin de siècle (systèmes les plus intenses)

Seuil : p97% INTmax HISTORIQUE



- Accord total pour une augmentation de fréquence, mais large gamme de valeurs : +38 à +326 %
- Très bon accord pour des systèmes plus courts et plus intenses

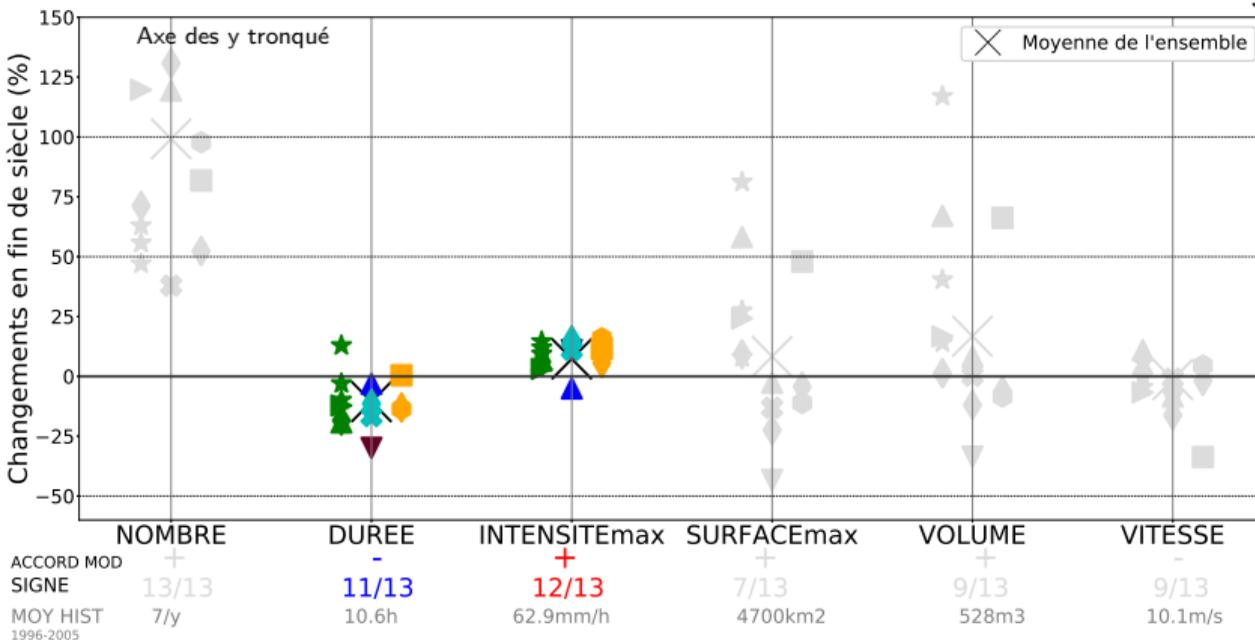


# Projections : Focus sur les épisodes méditerranéens français



## Changements relatifs des caractéristiques en fin de siècle (systèmes les plus intenses)

Seuil : p97% INTmax HISTORIQUE



- Accord total pour une augmentation de fréquence, mais large gamme de valeurs : +38 à +326 %
- Très bon accord pour des systèmes plus courts et plus intenses

AROME CCLM WRF RegCM UM

MPI-ESM-LR r1 Ec-Earth r12 Ec-Earth r14 r13 CNRM-CM5 r1 CNRM-CM5 r1\* HadGEM3-GC HadGEM3-ES r1 IPSL-CM5 r1

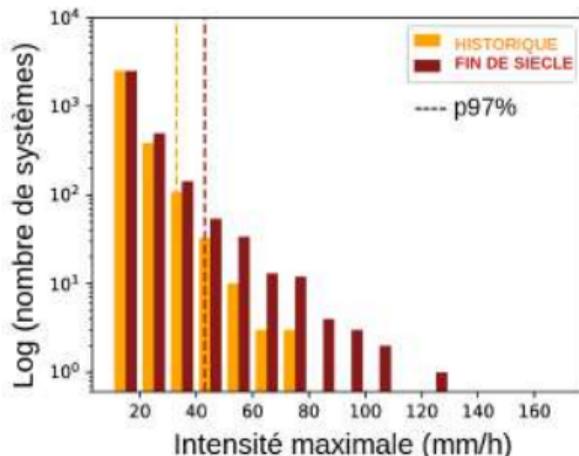
# Approche lagrangienne : Changements d'intensité des systèmes les plus intenses



## GPD (Generalized Pareto Distribution)

Les queues de distribution des intensités maximales des systèmes suivent une GPD  
Seuil : p97% INT<sub>max</sub> HISTORIQUE

### Exemple pour CNRM-AROME



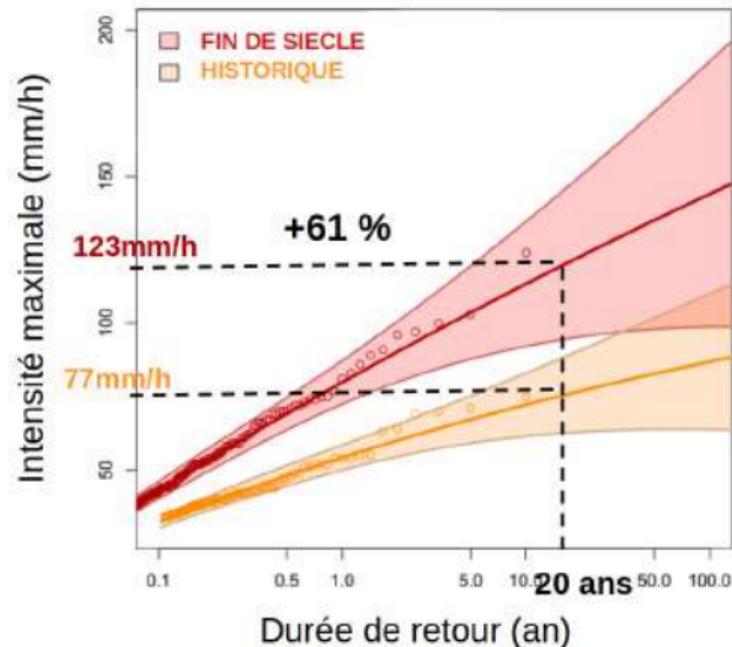
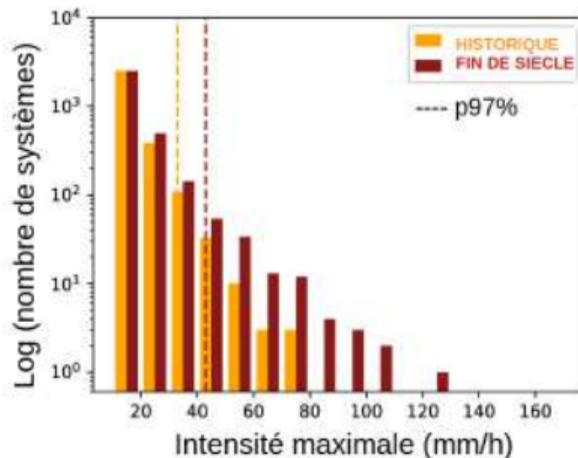
# Approche lagrangienne : Changements d'intensité des systèmes les plus intenses



## GPD (Generalized Pareto Distribution)

Les queues de distribution des intensités maximales des systèmes suivent une GPD  
Seuil : p97% INT<sub>max</sub> HISTORIQUE

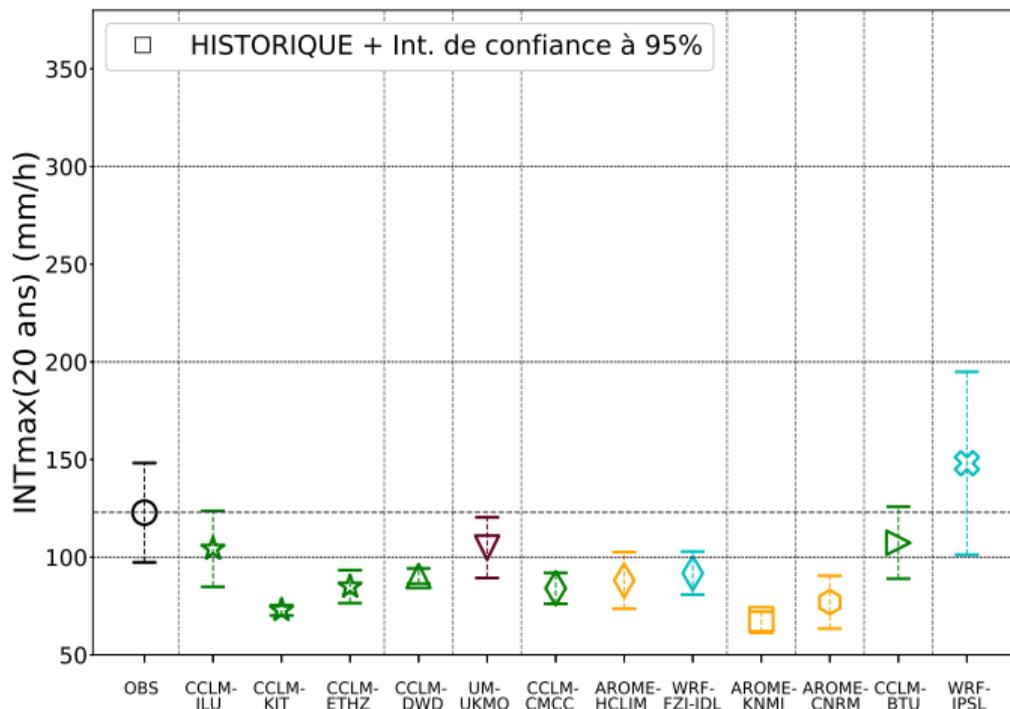
### Exemple pour CNRM-AROME



# Approche lagrangienne : Changements d'intensité des systèmes les plus intenses



## Comparaison des INTENSITEmax de durée de retour 20 ans (GPD)

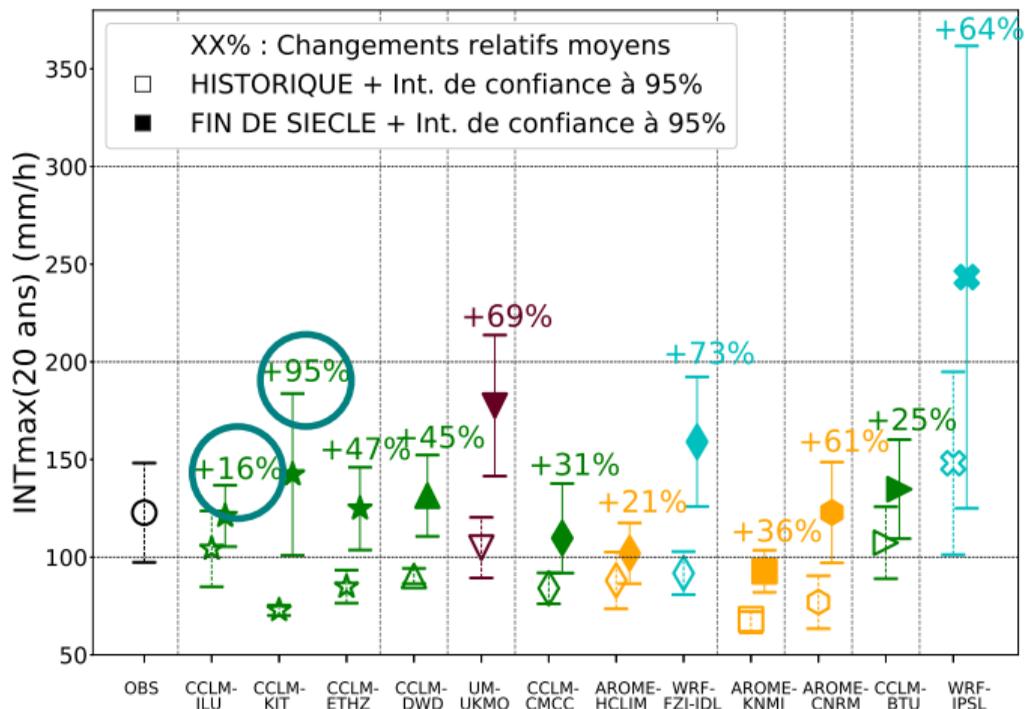


- Large gamme de changement possible, entre +16 et +95 %
- INTmax(20 ans) à partir des observations : 123 mm/h  
⇒ en fin de siècle, entre 142 et 239 mm/h
- Comment expliquer cette large gamme de valeurs ?

# Approche lagrangienne : Changements d'intensité des systèmes les plus intenses



## Comparaison des INTENSITEmax de durée de retour 20 ans (GPD)



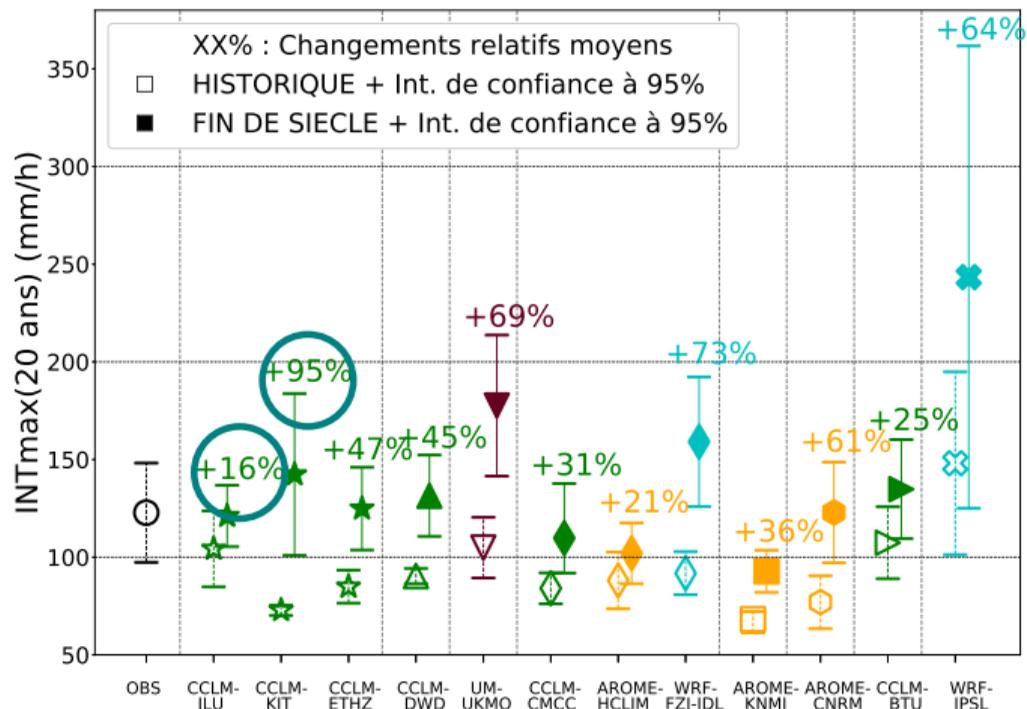
- Large gamme de changement possible, entre +16 et +95 %
- INTmax(20 ans) à partir des observations : 123 mm/h  
⇒ en fin de siècle, entre 142 et 239 mm/h
- Comment expliquer cette large gamme de valeurs ?

# Approche lagrangienne :

## Changements d'intensité des systèmes les plus intenses



### Comparaison des INTENSITEmax de durée de retour 20 ans (GPD)

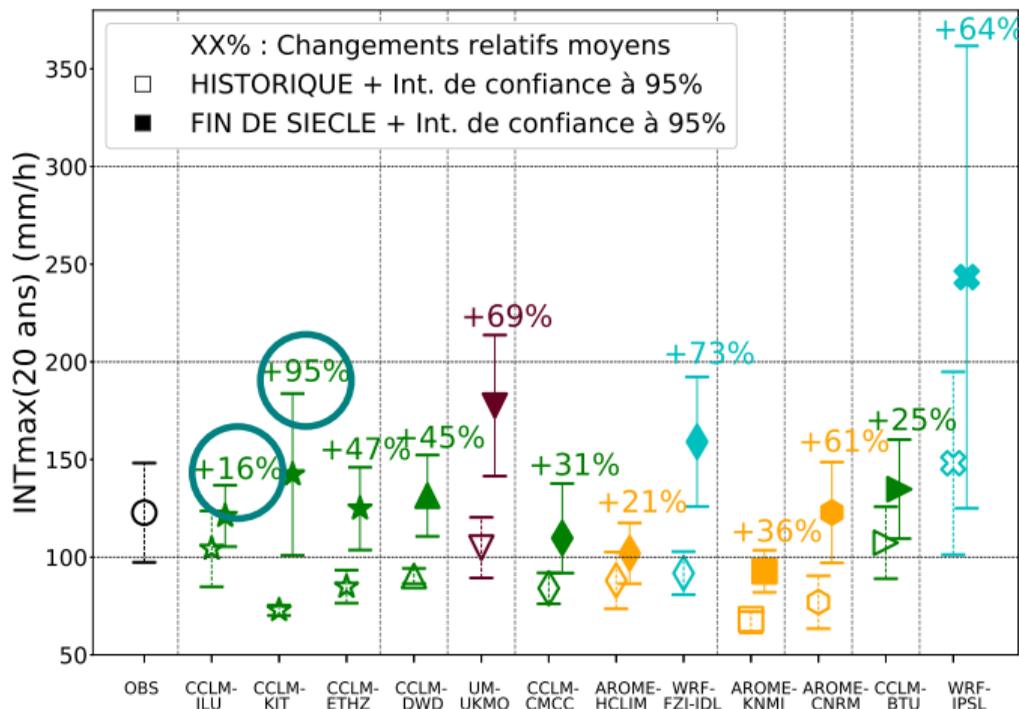


- Large gamme de changement possible, entre +16 et +95 %
- INTmax(20 ans) à partir des observations : 123 mm/h  
⇒ en fin de siècle, entre 142 et 239 mm/h
- Comment expliquer cette large gamme de valeurs ?

# Approche lagrangienne : Changements d'intensité des systèmes les plus intenses



## Comparaison des INTENSITEmax de durée de retour 20 ans (GPD)



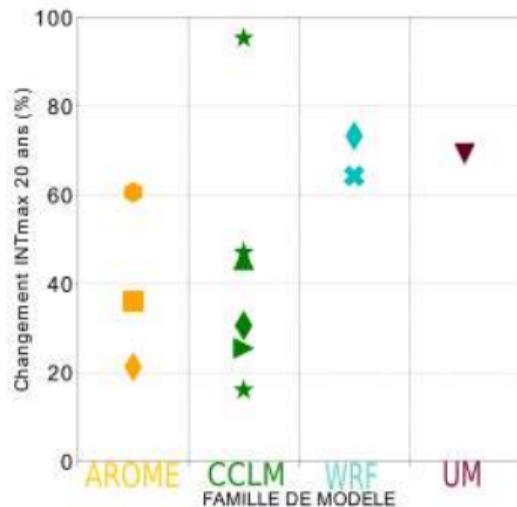
- Large gamme de changement possible, entre +16 et +95 %
- INTmax(20 ans) à partir des observations : 123 mm/h  
⇒ en fin de siècle, entre 142 et 239 mm/h
- Comment expliquer cette large gamme de valeurs ?

# Approche lagrangienne : Rechercher la source des incertitudes



## Changements des INTENSITEmax (20 ans)

En fonction de la famille de modèle



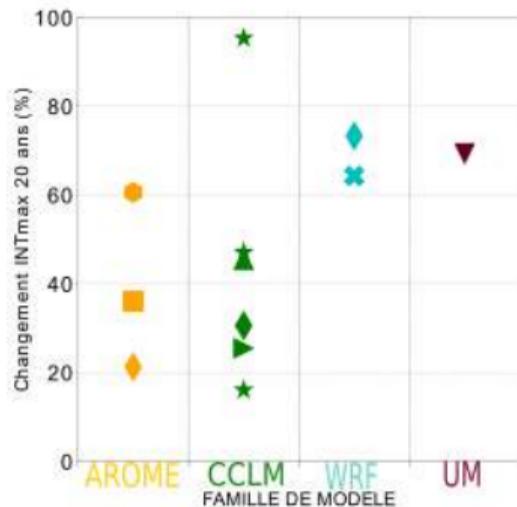
- Pas d'explication par famille de modèle
- Pas d'explication par modèle global de climat forceur

# Approche lagrangienne : Rechercher la source des incertitudes



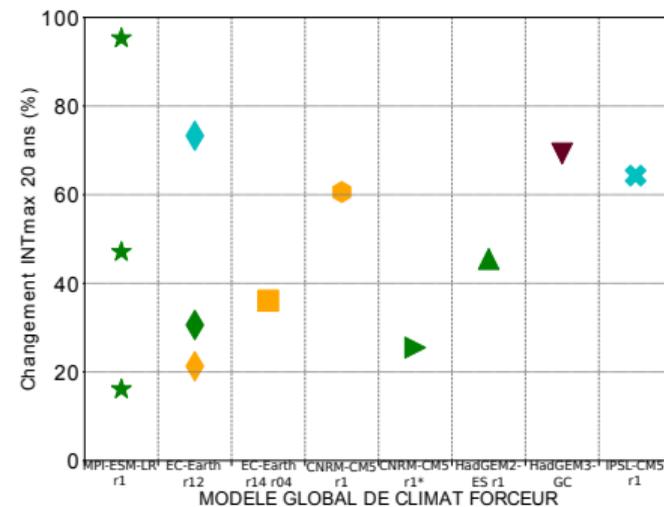
## Changements des INTENSITEmax (20 ans)

### En fonction de la famille de modèle



- Pas d'explication par famille de modèle
- Pas d'explication par modèle global de climat forcéur

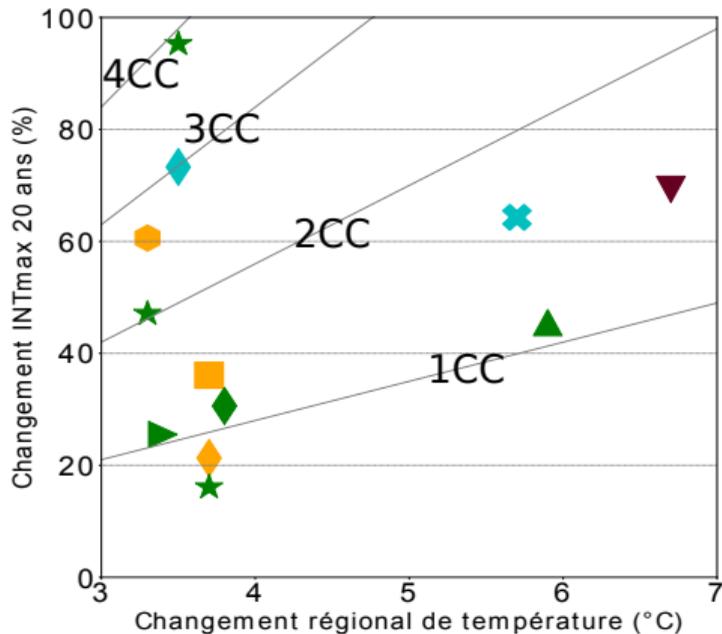
### En fonction du modèle global de climat forcéur



# Approche lagrangienne : Rechercher la source des incertitudes



## Changements des INTENSITEmax (20 ans) en fonction du réchauffement régional

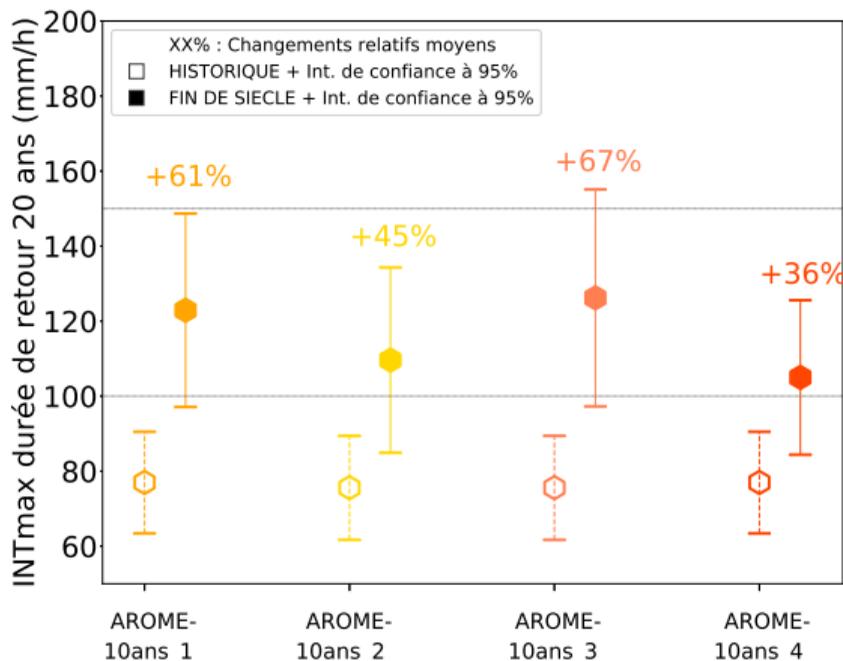


- Toujours une large gamme de changement possible : entre +4 et +27 %/°C, soit  $\sim +0.5$  à +4 fois le taux de Clausius-Clapeyron (CC)
  - Les changements les plus forts ne sont pas associés aux réchauffements les plus forts
- ⇒ Pas d'explication par le taux de réchauffement régional

# Approche lagrangienne : Rechercher la source des incertitudes



## Sensibilité à la durée des simulations : comparaison de 4 paires de simulations de 10 ans pour CNRM-AROME



- Entre +36 et +67 % suivant les couples de simulations de 10 ans
- ⇒ Une source d'incertitude est la variabilité naturelle du climat

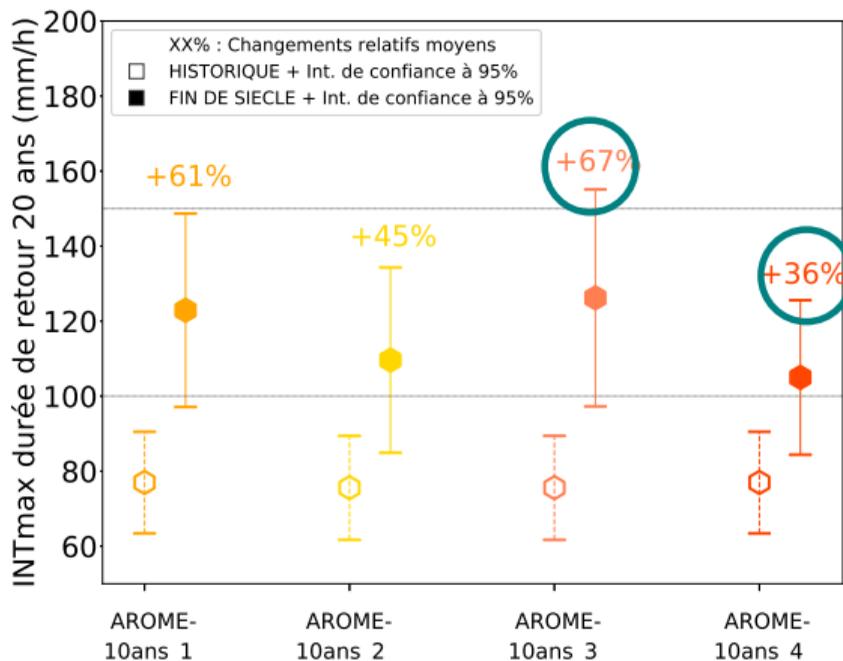
# Approche lagrangienne :

## Rechercher la source des incertitudes



### Sensibilité à la durée des simulations :

#### comparaison de 4 paires de simulations de 10 ans pour CNRM-AROME



- Entre +36 et +67 % suivant les couples de simulations de 10 ans
- ⇒ Une source d'incertitude est la variabilité naturelle du climat

# Plan de la présentation

- 1 Introduction
- 2 Méthodologie
  - La nouvelle génération de modèle de climat à résolution kilométrique
  - L'approche objet appliquée aux pluies extrêmes
- 3 Evaluation pour la simulation des épisodes méditerranéens
- 4 Evolution future des épisodes méditerranéens
- 5 Conclusion sur les épisodes méditerranéens
- 6 Autres applications : quelques exemples avec CNRM-AROME

## Conclusion - Episodes méditerranéens

### Evaluation

- Malgré quelques limitations, la nouvelle génération de modèle régional de climat à résolution kilométrique représente correctement les caractéristiques des épisodes méditerranéens
- ⇒ Outils de modélisation adaptés pour l'étude climatique de ces phénomènes extrêmes
- ⇒ Confiance accrue en ces modèles et donc en leurs projections futures

# Conclusion - Episodes méditerranéens

## Projections (*Caillaud et al. 2024 GRL*)

- Augmentation de la fréquence des systèmes fortement précipitants sur une grande partie du domaine pan-alpin avec doublement des zones touchées, mais pas d'accord clair sur le sud-est de la France

⇒ Rôle des modèles globaux de climat pour les changements de fréquence

Pour les systèmes les plus intenses, sur le sud-est de la France, en fin de siècle :

- Confirmation de l'augmentation des intensités, durée de vie plus petite
- Des incertitudes dans les gammes de changement proposées : fréquence entre +38 et +326 %, degré d'intensification jusqu'à +95 % (+4CC)
- Sources d'incertitude : modèles globaux de climat, variabilité naturelle du climat (10 ans, ensemble petit), protocole de simulations, scénario (RCP8.5)

Caillaud, C., Somot, S., Douville, H., Alias, A., Bastin, S. et al. (2024) Northwestern Mediterranean heavy precipitation events in a warmer climate : Robust versus uncertain changes with a large convection-permitting model ensemble. GRL.

<https://doi.org/10.1029/2023GL105143>

# Plan de la présentation

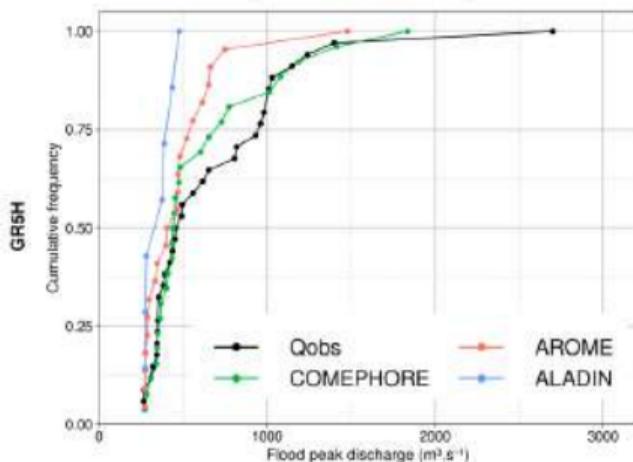
- 1 Introduction
- 2 Méthodologie
  - La nouvelle génération de modèle de climat à résolution kilométrique
  - L'approche objet appliquée aux pluies extrêmes
- 3 Evaluation pour la simulation des épisodes méditerranéens
- 4 Evolution future des épisodes méditerranéens
- 5 Conclusion sur les épisodes méditerranéens
- 6 **Autres applications : quelques exemples avec CNRM-AROME**

# Impacts hydrologiques : l'étude des crues méditerranéennes

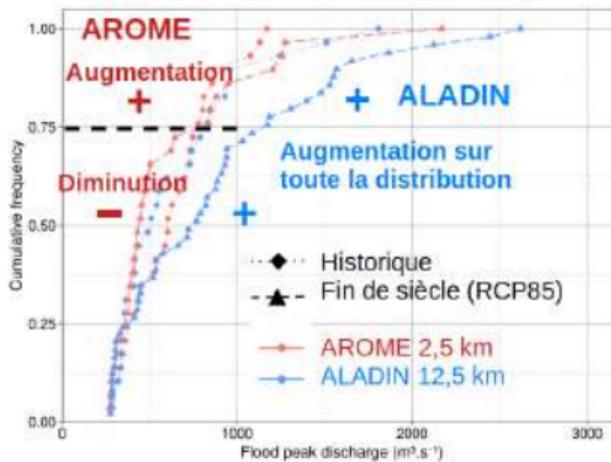
- Simulations hydrologiques forcées par AROME (2,5 km) et ALADIN (12,5 km)

Simulation de l'intensité des crues cévenoles : exemple pour le Gardon d'Anduze

## Evaluation (données brutes)



## Signaux futurs (après correction CDFT horaire)



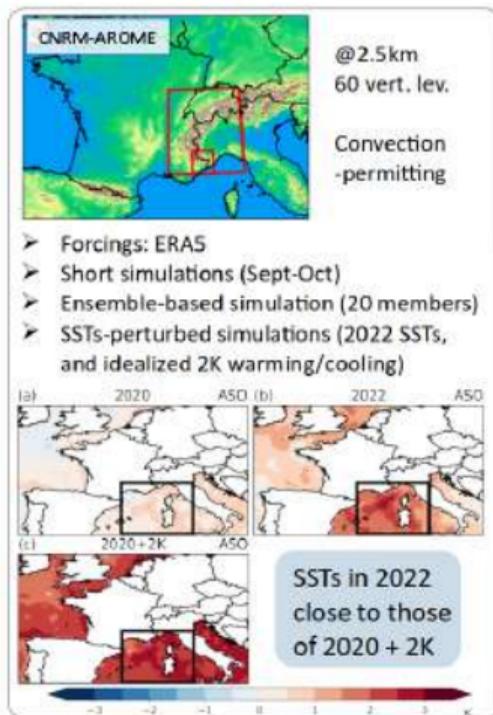
Soutenance de thèse  
Nils Poncet

Vendredi 26 avril  
9h30

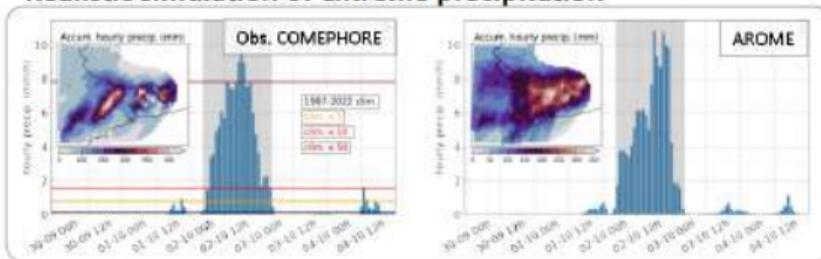
Poncet et al. 2024

# La futurisation d'événements extrêmes par l'approche "storyline"

- Cas de l'épisode méditerranéen sur les Alpes-Maritimes d'octobre 2020 : quel est l'effet de températures de surface de la mer plus chaudes ? *Bador et al. en révision*

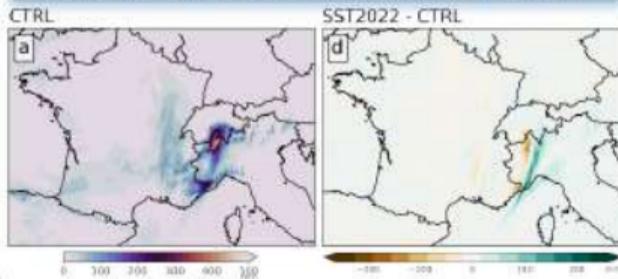


## Realistic simulation of extreme precipitation



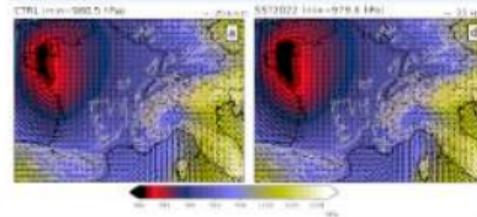
## Storyline - Plausible worst-case scenario

Milder precipitation-related impacts in the Alpes-Maritimes region but increased damage in Italy



High sensitivity to Med. SST warming

Limited impact of storm Alex changes on the Mediterranean HPE



## Contact

Margot Bador

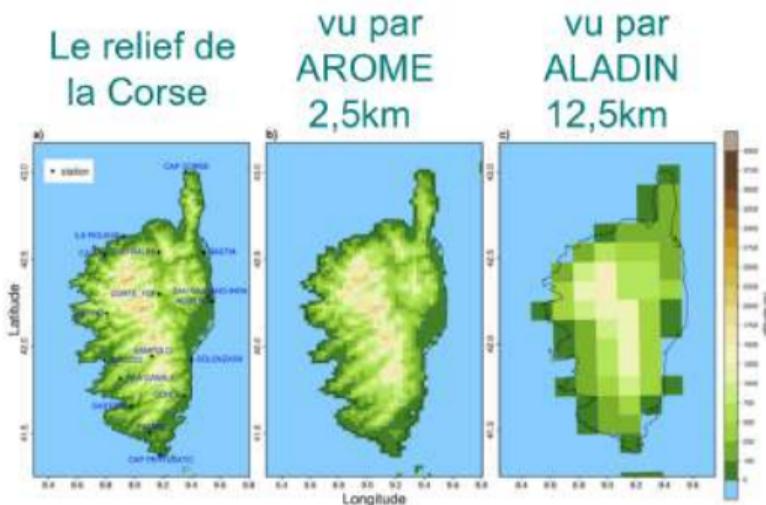
CECI, CNRS-CERFACS



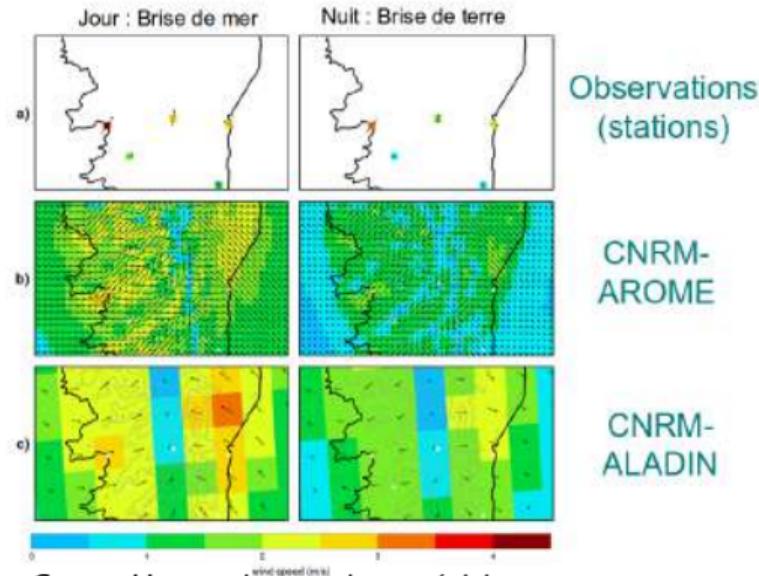
The present document has been produced by CERFACS, CNRS-CERFACS, under the leadership of Margot Bador. It is a work in progress and is not intended for publication.

# L'étude du climat des îles avec CNRM-AROME 2,5 km : Corse

- Etude de la valeur-ajoutée de CNRM-AROME par rapport à CNRM-ALADIN (12,5 km) pour représenter les caractéristiques du climat de la Corse
- Etude du changement climatique sur la Corse  
*Thèse d'Edith Cortes-Hernandez (CNRM/GMGEC/MOSCA)*

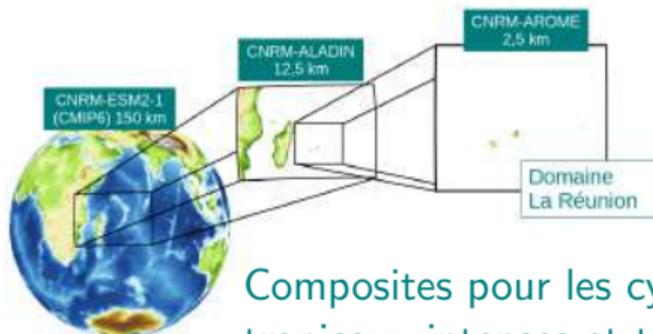


## Représentation des brises

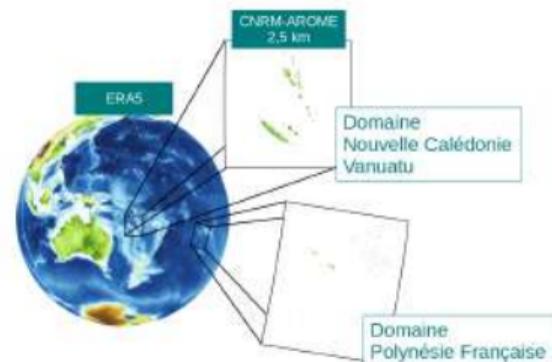


Cortes-Hernandez et al. en révision

# L'étude du climat des îles avec CNRM-AROME 2,5 km : Outre-Mer

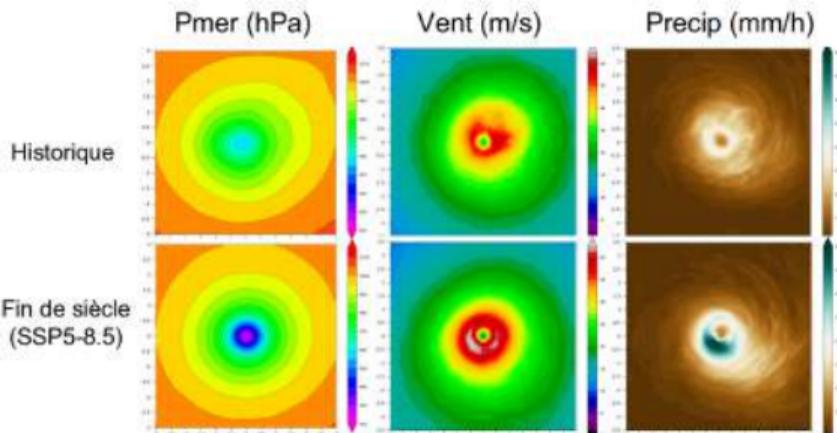


Composites pour les cyclones tropicaux intenses et très intenses

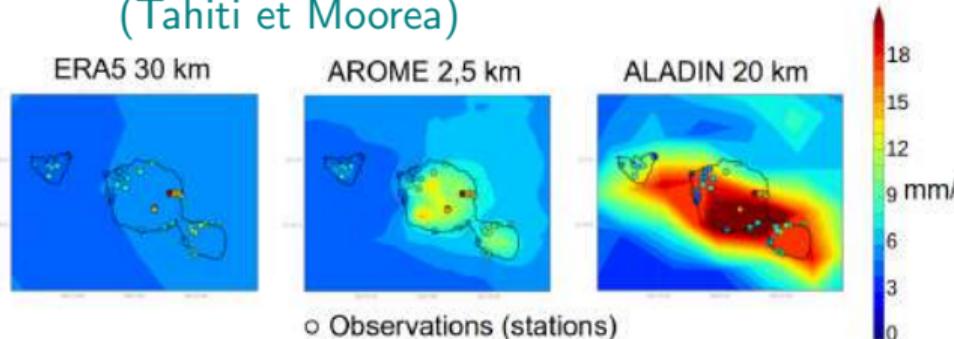


Hanh Le  
(projet CLIPSSA)

Précipitations journalières moyennes  
(Tahiti et Moorea)



N. Dimnet, M-D. Leroux (DIROI), E. Brisson

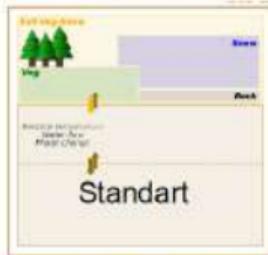


Thèse d'Amarys Casnin (CNRM/GMGEC/ATMO)

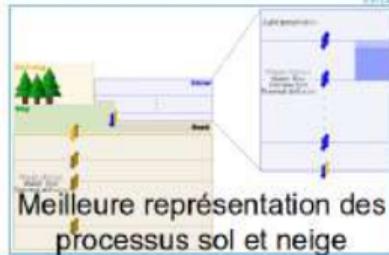
# Etude du climat des montagnes avec CNRM-AROME

- Surestimation identifiée de la hauteur et de la couverture de neige par CNRM-AROME  
*Monteiro et al. 2022*

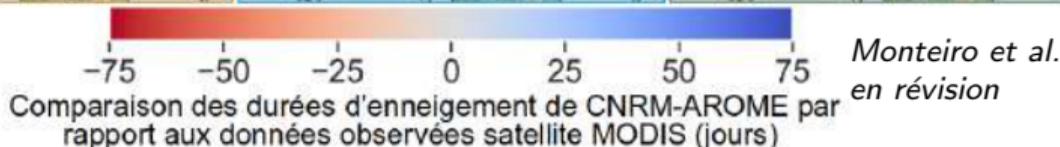
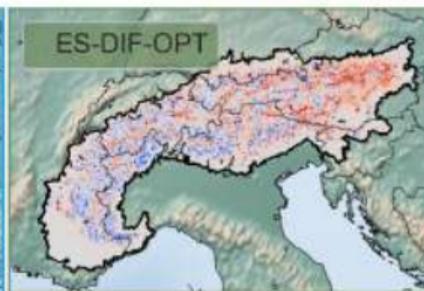
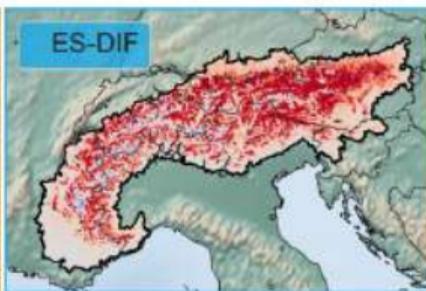
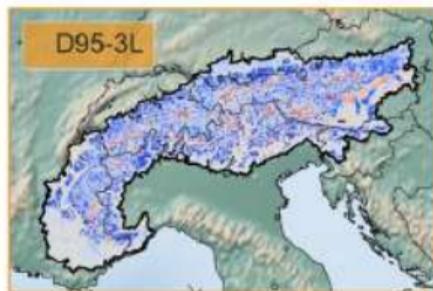
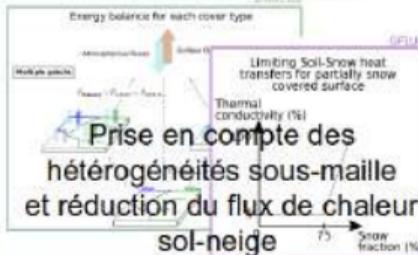
## Schémas ISBA 3L-D95



## Schémas ISBA DIF-ES



## + 3 Patches + GFLUX

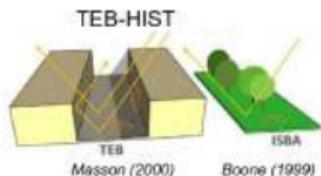


Amélioration de la simulation du manteau neigeux par l'utilisation de différents schémas de sol et de neige

Soutenance de thèse  
Diego Monteiro

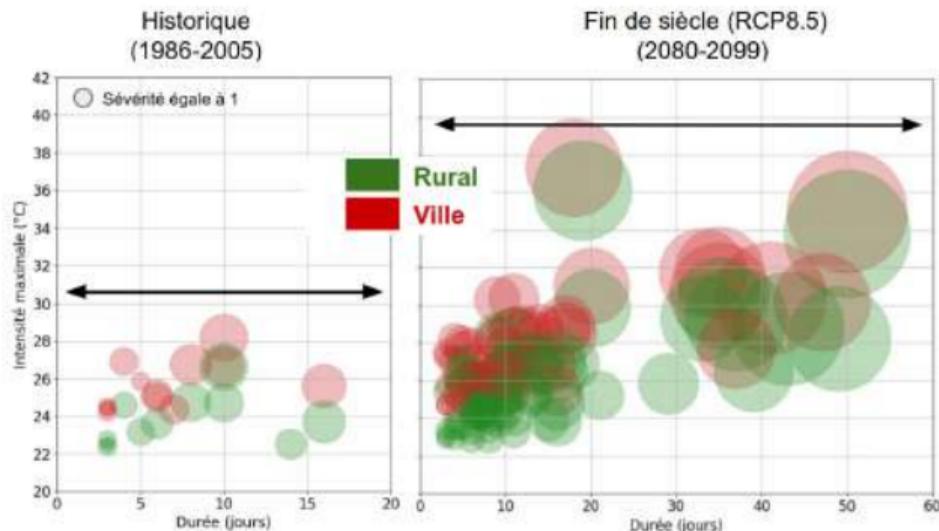
Vendredi 26 avril  
9h30

# L'étude du climat urbain avec CNRM-AROME 2,5 km



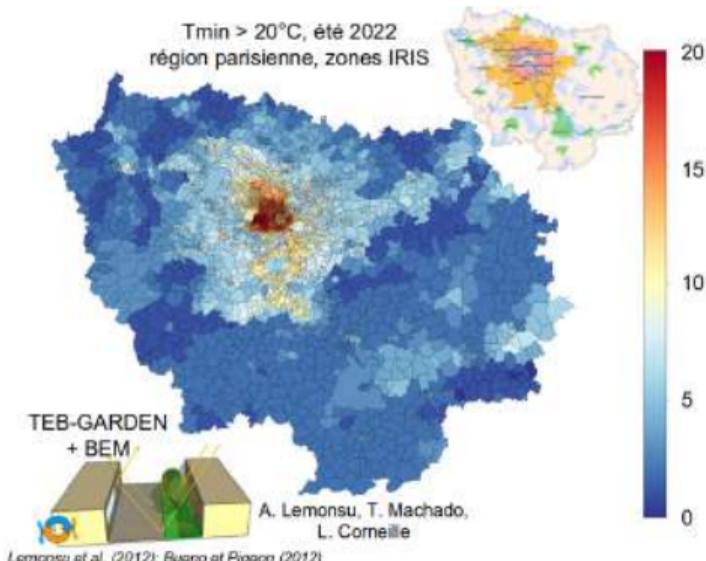
- Utilisation d'un modèle de ville (TEB) dans CNRM-AROME
- Etudes d'évaluation sur Paris (*Lemonsu et al. 2023*) et sur 12 villes françaises (*Michau et al. 2023*)

## Évolution des vagues de chaleur sur Paris



*Michau et al. en révision, Michau 2023*

## Nombre de nuits tropicales



*Thèse de Léa Corneille (CNRM/GMME/VILLE)*

# Conclusion finale et perspectives

## Conclusion

- Les modèles régionaux de climat à résolution kilométrique ouvrent de nouvelles perspectives d'étude (extrêmes, climat urbain, climat des îles, climat des montagnes, impacts...)

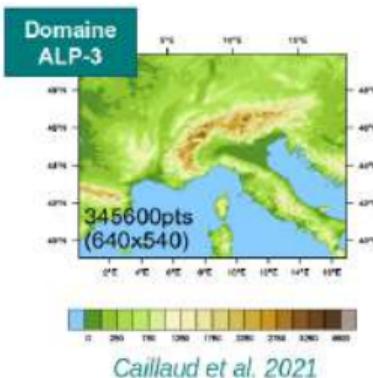
## Perspectives

- ① Mieux représenter la variabilité naturelle du climat
  - ⇒ allonger les simulations
  - ⇒ multiplier les simulations : approche storyline, descente d'échelle hybride type émulateur (*Doury et al. 2022*)
  - ⇒ poursuivre la coordination internationale (ensembles, diversité)
- ② Diminuer les incertitudes liées aux modèles ⇒ sélection des modèles, poursuite de leur amélioration et de leur complexification

# Les simulations disponibles avec CNRM-AROME (2,5 km) sur la France

- Les données netcdf horaires des simulations réalisées sur le domaine pan-alpin sont en cours de publication sur l'ESGF (T. Machado et A. Barbu)

<https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/search/cordex-ipsl/>



### Forçage ERAInterim

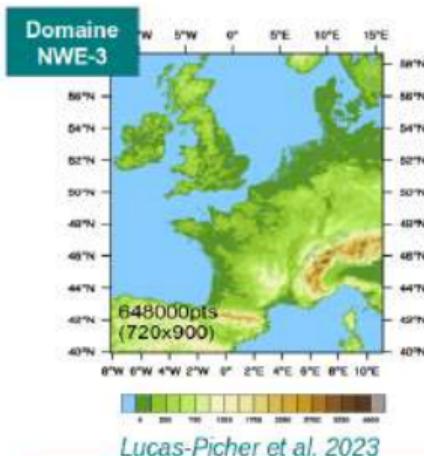
Evaluation : 1981-2018 (38 ans)

### Forçage CNRM-CM5 RCP8.5

Historique : 1986-2005 (20 ans)

Milieu de siècle : 2041-2060 (20 ans)

Fin de siècle : 2080-2099 (20 ans)



### Forçage ERAInterim

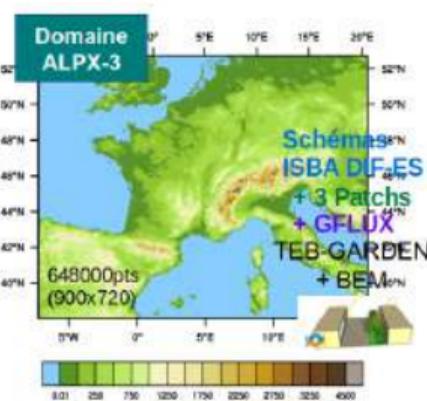
Evaluation : 2000-2018 (19 ans)

### Forçage CNRM-CM5 RCP8.5

Historique : 1986-2005 (20 ans)

Milieu de siècle : 2041-2050 (10 ans)

Fin de siècle : 2080-2099 (20 ans)



### Simulations bientôt lancées

(A. Alias, E. Harader-Coustau, T. Machado, A. Lemonsu, L. Corneille, D. Monteiro, C. Caillaud)

### Forçage direct ERA5

Evaluation : 1959-2020

### Forçage CNRM-ESM2-1 SSP3-7.0

1988-2100

EN PREPARATION

# Bibliographie

- Ban et al. (2021)** The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution, Part I : Evaluation of precipitation. *Clim Dyn.* <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05708-w>
- Caillaud et al. (2021)** Modelling Mediterranean heavy precipitation events at climate scale : an object-oriented evaluation of the CNRM-AROME convection-permitting regional climate model. *Clim Dyn.* <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05558-y>
- Caillaud, C. (2023)** Sensibilité climatique des systèmes précipitants intenses : approche par la modélisation climatique à très haute résolution sur le nord-ouest de la Méditerranée (Doctoral dissertation). <https://theses.hal.science/tel-04449346>
- Caillaud et al. (2024)** Northwestern Mediterranean heavy precipitation events in a warmer climate : Robust versus uncertain changes with a large convection-permitting model ensemble. *GRL.* <https://doi.org/10.1029/2023GL105143>
- Lemonsu et al. (2023)** What added value of CNRM-AROME convection-permitting regional climate model compared to CNRM-ALADIN regional climate model for urban climate studies ? Evaluation over Paris area (France). *Clim Dyn.* <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06647-w>
- Lucas-Picher et al. (2023)** Evaluation of the convection-permitting regional climate model CNRM-AROME41t1 over northwestern Europe, *Clim Dyn.* <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06637-y>
- Michau et al. (2023)** Evaluation of the Urban Heat Island of 12 cities of France in a high-resolution regional climate model simulation. *Urban Climate.* <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101386>
- Michau, Y. (2023)** Modélisation de l'évolution du climat urbain dans un contexte de changements globaux : le cas des villes françaises (Doctoral dissertation).
- Monteiro et al. (2022)** Potential and limitations of convection-permitting CNRM-AROME climate modelling in the French Alps. *International Journal of Climatology.* <https://doi.org/10.1002/joc.7637>
- Pichelli et al. (2021)** The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution part 2 : historical and future simulations of precipitation. *Clim Dyn.* <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05657-4>