



HAL
open science

Sensibilité climatique des systèmes précipitants intenses : approche par la modélisation climatique à très haute résolution sur le nord-ouest de la Méditerranée

Cecile Barlan Caillaud

► To cite this version:

Cecile Barlan Caillaud. Sensibilité climatique des systèmes précipitants intenses : approche par la modélisation climatique à très haute résolution sur le nord-ouest de la Méditerranée. Sciences de la Terre. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2023. Français. NNT : 2023INPT0111 . tel-04449346

HAL Id: tel-04449346

<https://theses.hal.science/tel-04449346>

Submitted on 29 Apr 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse INP)

Discipline ou spécialité :

Océan, atmosphère, climat

Présentée et soutenue par :

Mme CECILE BARLAN

le vendredi 15 décembre 2023

Titre :

Sensibilité climatique des systèmes précipitants intenses : approche par la modélisation climatique à très haute résolution sur le nord-ouest de la Méditerranée

Ecole doctorale :

Sciences de l'Univers de l'Environnement et de l'Espace (SDU2E)

Unité de recherche :

Centre national de recherches météorologiques (CNRM METEO)

Directeur(s) de Thèse :

M. HERVÉ DOUVILLE

Rapporteurs :

M. ALEJANDRO DI LUCA, UNIVERSITE DU QUEBEC A MONTREAL

MME JULIETTE BLANCHET, CNRS SAINT MARTIN D'HERES

Membre(s) du jury :

M. JULIEN BOÉ, CERFACS, Président

M. HERVÉ DOUVILLE, CENTRE NATIONAL DE RECHERCHES METEO, Membre

MME SEGOLENE BERTHOU, MET OFFICE, Membre

M. SAMUEL SOMOT, ECOLE NATIONALE DE LA METEOROLOGIQUE, Invité

M. YVES TRAMBLAY, IRD MONTPELLIER, Membre

Remerciements

Je souhaite, tout d'abord, remercier mes deux encadrants de thèse : Samuel qui m'a encouragé à me lancer et m'a permis d'arriver au bout de cette thèse qui intervient après un changement de carrière de la prévision vers la recherche où j'ai eu la chance de rejoindre son équipe ; Hervé qui a pris la relève de Véronique dès le début de la thèse avec une implication constante dans mon encadrement. Ils ont partagé avec moi, sans compter, expérience et expertise, ce qui a fortement contribué à la réussite de cette thèse et à mon développement académique et professionnel. Merci à eux deux pour leur disponibilité, leurs conseils, leurs remarques toujours constructives et pertinentes, leurs nombreuses idées ouvrant souvent vers de nouvelles perspectives et leurs regards croisés qui m'ont fait grandir sur le plan scientifique tout au long de ces trois années. J'ai apprécié votre appui scientifique et votre soutien pendant la thèse et je suis heureuse de pouvoir continuer à travailler avec vous ces prochaines années.

Merci à Michel que je n'ai pas croisé très longtemps au CNRM, mais dont l'influence et l'exemple sont toujours présents dès que l'on s'intéresse à la modélisation climatique régionale. Après son co-encadrement avec Samuel de mon stage de PFE, ne pas avoir continué en recherche dès la sortie de l'école restait un regret, que je n'ai plus avec l'aboutissement de cette thèse. Merci à Véronique dont les travaux sur les épisodes méditerranéens ont été sources d'inspiration et également pour sa participation à mon premier article.

Un grand merci également à tous mes collègues de l'équipe MOSCA, Antoinette, Edith, Elizabeth, Florence, Julie, Antoine, Ivan, Marc, Nils, Pierre, Tiago, les deux Thomas. La bonne ambiance, la bienveillance et l'intérêt porté les uns aux autres au sein de l'équipe ont permis des conditions de travail idéales pour la réalisation de ma thèse. Merci pour leur soutien et leurs encouragements, surtout dans les derniers mois. Et merci aussi pour tous les bons moments partagés ensemble, au travail ou en dehors.

Je tiens en particulier à remercier Antoinette qui a joué un rôle particulier dès mon arrivée dans l'équipe et tout au long de la thèse. Super co-bureau, sa gentillesse, sa disponibilité, ses compétences dont elle m'a transmis une (petite) partie, son aide précieuse qui dépasse de loin les aspects techniques, son soutien ne se sont pas démentis tout au long de la thèse, même dans les moments plus difficiles, et ont été déterminants pour sa bonne réalisation.

Merci aussi à Quentin qui finissait sa thèse quand j'ai commencé la mienne. Mes travaux se placent dans la suite directe des siens et je dois le remercier pour avoir partagé avec moi, avec gentillesse et bonne humeur, son expérience qui m'a grandement facilité la prise en main du modèle AROME et de nombreux outils.

Pour leur aide précieuse, merci à Yann (AROME), Isabelle (OSIRIS) et Olivier (COMEPHORE) que j'ai beaucoup sollicités, surtout au début de la thèse et merci à Aurélien pour son aide en statistiques. Merci également à tous ceux que j'ai pu rencontré dans le cadre de l'utilisation d'AROME en climat au CNRM et au delà, Amarys, Aude, Clotilde,

Diego, Erwan, Hanh, Léa, Lola, Marie-Dominique, Margot, Philippe, Sébastien, Yohanna. Les échanges, notamment au cours des réunions mensuelles, ont élargi mes connaissances et nourri mes réflexions sur l'utilisation d'AROME en climat.

Ensuite, je souhaite remercier plus largement les collègues du CNRM pour leur aide, conseils ou discussions informelles. En particulier (et je dois en oublier), merci à Alina, Aurore, Christine, Damien, David, Fabrice, Foussiya, Gilles, Jeanne, Jonathan, Laurent, Martine, Shan, Virginie, Marc et Cindy.

Merci également aux collègues de SIREs, en particulier Nicolas, Henri-Pierre et Pierre, pour leur assistance technique et leurs solutions toujours rapides à mes problèmes ou besoins.

Merci également aux chercheurs que j'ai pu rencontré lors de leur passage au CNRM ou lors de participations à des projets et programmes européens, qui ont nourri mes recherches et dont certaines collaborations ont abouti à des articles communs mentionnés dans cette thèse. En particulier, merci à Emanuela, Nikolina et Ségolène.

Je tiens d'autre part à remercier Sophie Bastin, Didier Ricard et Thomas Fiolleau pour avoir accepté de faire partie de mon comité de thèse et pour toutes les discussions et les conseils avisés donnés lors des réunions de ce comité. Un grand merci aussi à Juliette Blanchet et Alejandro Di Luca pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse, pour leur lecture attentive du manuscrit, leurs retours constructifs sur mon travail de thèse et leurs commentaires et questions très pertinentes lors de la soutenance. Merci également à Ségolène Berthou, Yves Tramblay et Julien Boe, pour avoir fait partie de mon jury de thèse et pour avoir permis des discussions enthousiasmantes lors de la soutenance en soulevant des questions qui alimenteront mes recherches pour les prochaines années.

Je termine par remercier ma famille pour leur soutien, en particulier ces derniers mois où le travail de rédaction du manuscrit et la préparation de la soutenance ont accaparé beaucoup de mon temps et empiété sur la sphère personnelle. Une pensée particulière pour ma tante Françoise qui n'a malheureusement pas pu m'accompagner les derniers mois.

Résumé

Les épisodes méditerranéens qui concernent chaque automne le nord-ouest de la Méditerranée sont des événements de précipitation extrême à fort impact. L'étude de leur évolution aux échelles climatiques revêt donc une grande importance et constitue encore un défi pour la communauté de modélisation du climat. Depuis quelques années, il est possible d'utiliser des modèles régionaux de climat à résolution kilométrique (Convection-Permitting Regional Climate Models ou CP-RCMs, 1-3 km) dont la convection profonde est simulée de manière explicite. Ces modèles permettent de se rapprocher des échelles spatio-temporelles en jeu et ouvrent de nouvelles perspectives en termes d'analyse.

Cette thèse a pour objectif de déterminer la réponse des épisodes méditerranéens du nord-ouest de la Méditerranée au changement climatique d'origine humaine, en s'appuyant sur cette nouvelle génération de modèles de climat associée à une approche orientée objet. Le suivi des systèmes fortement précipitants est appliqué à la fois aux jeux de données d'observation, aux simulations réalisées avec le CP-RCM CNRM-AROME et aux simulations du premier ensemble de CP-RCMs disponible dans le cadre du programme international CORDEX FPS Convection sur un domaine commun couvrant le nord-ouest de la Méditerranée.

La première partie de cette thèse est consacrée à l'évaluation des performances des CP-RCMs par comparaison à des données d'observation de référence à haute résolution. La valeur ajoutée des CP-RCMs par rapport aux modèles régionaux à résolution plus grossière (12-15 km) est démontrée pour les extrêmes de précipitation, en particulier au pas de temps horaire. L'approche objet permet également de montrer que, malgré quelques biais résiduels, les CP-RCMs sont capables de représenter correctement les principales propriétés des systèmes fortement précipitants, que ce soit en termes de nombre et de positionnement sur l'ensemble du domaine, ou en termes de durée, d'intensité, de surface, de volume, de vitesse et de sévérité sur le pourtour méditerranéen français où les observations permettent d'évaluer finement ces propriétés. La bonne performance de ces modèles permet de renforcer la confiance en leurs projections futures.

La deuxième partie s'intéresse à l'évolution future des épisodes méditerranéens avec l'approche objet appliquée aux simulations milieu et fin de siècle de l'ensemble de CP-RCMs en mode scénario pour étudier les changements des propriétés des systèmes fortement précipitants dans un climat plus chaud. En fin de siècle et selon un scénario de fortes émissions, certains changements se retrouvent dans la plupart des simulations et peuvent être qualifiés de robustes. Ainsi, une augmentation de la fréquence des systèmes fortement précipitants de l'automne dans une grande partie du domaine, en particulier du centre de l'Italie au nord des Balkans, accompagne un doublement des zones touchées par ces

événements. Sur la région méditerranéenne française, les modèles s'accordent sur une augmentation d'intensité, de surface et de volume des systèmes précipitants. Toutefois, même avec cette nouvelle génération de modèles, d'importantes incertitudes persistent, notamment pour les changements de fréquence dans le sud-est de la France, probablement dus à des différences dans les conditions synoptiques imposées par les modèles forceurs des CP-RCMs. De même, l'ensemble projette une large gamme de changements possibles dans les propriétés des systèmes, en particulier pour les plus intenses et y compris lorsqu'on normalise par le réchauffement régional correspondant.

Si les CP-RCMs sont les outils de modélisation adaptés pour l'étude des extrêmes de précipitation, les efforts doivent être poursuivis pour produire des ensembles plus larges, mieux construits et probablement complétés par des méthodes d'apprentissage machine, afin d'apporter des informations climatiques utiles aux échelles pertinentes pour les politiques d'adaptation.

Abstract

The Mediterranean Heavy Precipitation Events (HPEs) that affect the northwestern Mediterranean every fall are high-impact weather events. The study of their evolution on climate scales is therefore of great importance and remains a challenge for the climate modelling community. For some years now, it has been possible to use kilometre-scale regional climate models (Convection-Permitting Regional Climate Models or CP-RCMs, 1-3 km) in which deep convection is explicitly simulated. These models make it possible to get closer to the spatio-temporal scales involved and open up new perspectives in terms of analysis.

The aim of this thesis is to determine the response of northwestern Mediterranean HPEs to human-induced climate change, using this new generation of climate models combined with an object-oriented approach. The tracking of heavy precipitation systems is applied to observational datasets, to simulations carried out with the CNRM-AROME CP-RCM and to simulations of the first ensemble of CP-RCMs available as part of the international CORDEX FPS Convection programme over a common domain covering the north-western Mediterranean.

The first part of this thesis is devoted to evaluating the performance of CP-RCMs in comparison with high-resolution reference observation data. The added value of CP-RCM compared with regional models with coarser resolution (12-15 km) is demonstrated for precipitation extremes, particularly at hourly time steps. The object-oriented approach also shows that, despite a few residual biases, CP-RCMs are capable of correctly representing the principal properties of heavy precipitation systems, both in terms of number and position over the entire domain, and in terms of duration, intensity, surface area, volume, speed and severity over the French Mediterranean, where observations enable these properties to be assessed in detail. The good performance of these models lends greater confidence to their future projections.

The second part focuses on the future evolution of Mediterranean HPEs using the object-oriented approach applied to mid and end-of-century simulations of the CP-RCMs ensemble in scenario mode to study changes in the properties of heavy precipitation systems in a warmer climate. At the end of the century, and according to a scenario of high emissions, certain changes are found in most of the simulations and can be described as robust. For example, an increase in the frequency of fall heavy precipitation systems over a large part of the domain, particularly from central Italy to the northern Balkans, is accompanied by a doubling of the areas affected by these events. Over the French Mediterranean region, the models agree on an increase in the intensity, surface area and volume of precipitating systems. However, even with this new generation of models, significant uncertainties remain, particularly for changes in frequency over southeastern France, probably due to differences in the synoptic conditions imposed by the CP-RCMs driving models. Similarly,

the ensemble projects a wide range of possible changes in the properties of systems, particularly for the most intense ones and even when standardised by the corresponding regional warming.

While CP-RCMs are the appropriate modelling tools for studying precipitation extremes, efforts must be continued to produce larger, better constructed ensembles, probably supplemented by machine learning methods, in order to provide useful climate information at scales relevant to adaptation policies.

Sommaire

1	Introduction	1
1.1	Les épisodes méditerranéens	2
1.1.1	L'épisode méditerranéen sur les Alpes-Maritimes des 2-3 octobre 2020	2
1.1.2	Qu'est-ce qu'un épisode méditerranéen?	5
1.1.3	Tendance climatique passée des épisodes méditerranéens	16
1.2	Représentation des épisodes méditerranéens dans les modèles de climat . .	19
1.2.1	Par les modèles globaux de climat	19
1.2.2	Par une descente d'échelle statistique à partir des modèles globaux de climat	21
1.2.3	Par une descente d'échelle dynamique avec des modèles régionaux de climat	22
1.2.4	Les sources d'incertitudes des projections climatiques	27
1.2.5	Performance des modèles et notion de valeur ajoutée	29
1.2.6	Bilan : comparaison des outils de modélisation climatique pour l'étude des épisodes méditerranéens	31
1.3	Evolution future des pluies extrêmes méditerranéennes	32
1.3.1	Evolution future du climat méditerranéen	32
1.3.2	Projections des pluies extrêmes méditerranéennes par les GCMs . .	34
1.3.3	Projections des pluies extrêmes méditerranéennes par les RCMs . .	36
1.3.4	Projections des pluies extrêmes méditerranéennes par les CP-RCMs	38
1.3.5	Le cadre de recherche européen pour les études avec des CP-RCMs	40
1.4	L'approche objet appliquée aux pluies extrêmes	42
1.5	Objectifs de la thèse et organisation du manuscrit	46
1.5.1	Objectifs	46
1.5.2	Questions scientifiques	48
1.5.3	Organisation du manuscrit	49
2	Données d'observation, de modèles et méthodologie	51
2.1	Les données d'observation de référence	53
2.1.1	Le choix des bases de données d'observation	53
2.1.2	COMEPHORE sur la France métropolitaine	54
2.1.3	RadissagH sur la Suisse	56
2.1.4	RADKLIM sur l'Allemagne	57
2.1.5	GRIPHO sur l'Italie	57
2.1.6	EURO4M-APGD sur le domaine pan-alpin	57
2.1.7	Les limites des jeux de données d'observation	57
2.2	La chaîne de modélisation du climat au CNRM	58

2.2.1	La réanalyse globale ERA-Interim	58
2.2.2	CNRM-CM5	59
2.2.3	CNRM-ALADIN	60
2.2.4	CNRM-AROME	62
2.2.5	Protocole d'une simulation climatique avec CNRM-AROME	67
2.3	Les simulations climatiques avec CNRM-AROME pour l'étude des épisodes méditerranéens	72
2.3.1	La simulation d'évaluation	73
2.3.2	Les simulations en climat présent et futur	76
2.4	L'ensemble multi-modèle du CORDEX-FPS Convection	78
2.5	L'approche orientée objet pour la détection et le suivi des épisodes méditerranéens	83
2.5.1	Choix de l'algorithme	83
2.5.2	Principe	85
2.5.3	L'indice de sévérité	88
2.5.4	Les distributions spatiales de systèmes précipitants ou densités	88
2.5.5	Les graphes de type Intensity Duration Frequency (IDF) et Intensity Area Frequency (IAF)	89
2.5.6	Les graphes de type "Bubble plot"	89
2.5.7	Sélection des systèmes précipitants appartenant aux épisodes méditerranéens français	90
2.5.8	Domaines de tracking	92
2.6	Outils complémentaires	92
2.6.1	Grilles de référence, interpolation et spin-up spatial	92
2.6.2	Significativité statistique par une méthode de bootstrap	93
3	Evaluation des CP-RCMs pour la simulation des épisodes méditerranéens	95
3.1	Evaluation orientée objet du CP-RCM CNRM-AROME pour la simulation des épisodes méditerranéens	96
3.1.1	Résumé de l'article	96
3.1.2	Article publié dans Climate Dynamics	97
3.1.3	Complément pour l'évaluation de CNRM-AROME	135
3.2	Evaluation de l'ensemble de CP-RCMs du FPS Convection pour la simulation des épisodes méditerranéens	135
3.2.1	Approche eulérienne	135
3.2.2	Approche lagrangienne	139
3.3	Evaluation multi-tracker de l'ensemble du FPS Convection pour la simulation des événements précipitants sur le domaine pan-alpin	152
3.3.1	Référence de l'article publié dans Climate Dynamics	152
3.3.2	Résumé de l'article	152
3.4	Synthèse de l'évaluation des CP-RCMs pour la simulation des épisodes méditerranéens	155
3.4.1	Points forts	155
3.4.2	Limitations	156
3.4.3	Bilan	157

4	Evolution future des épisodes méditerranéens par un ensemble de CP-RCMs	159
4.1	Approche eulérienne	160
4.2	Approche lagrangienne	163
4.2.1	Résumé de l'article en français	164
4.2.2	Article en révision dans Geophysical Research Letters	166
4.3	Synthèse de l'évolution future des épisodes méditerranéens par un ensemble de CP-RCMs	217
4.3.1	Points forts	217
4.3.2	Limitations	220
4.3.3	Bilan	222
5	Conclusions et perspectives	223
5.1	Conclusion méthodologique	223
5.1.1	Les épisodes méditerranéens comme objet d'étude	223
5.1.2	Le modèle régional de climat à convection profonde résolue (CP-RCM) : un nouvel outil de modélisation climatique	223
5.1.3	Un ensemble de simulations avec des CP-RCMs	224
5.1.4	Des observations de référence	225
5.1.5	L'approche objet : un nouvel outil d'analyse des CP-RCMs	225
5.2	Les événements précipitants intenses méditerranéens sont-ils bien représentés par les modèles régionaux de climat à convection profonde résolue?	226
5.2.1	Les CP-RCMs apportent de la valeur ajoutée	226
5.2.2	Les CP-RCMs présentent quelques limitations	227
5.2.3	Comment améliorer le protocole expérimental?	228
5.2.4	Comment améliorer le comportement des CP-RCMs?	230
5.3	Que révèlent les modèles de dernière génération sur la réponse de ces phénomènes au changement climatique et quelles sont les incertitudes associées?	232
5.3.1	Certains changements sont robustes	232
5.3.2	Des incertitudes importantes restent présentes	233
5.3.3	Comment comprendre les changements et l'origine des incertitudes?	234
5.3.4	Comment aller vers des résultats plus robustes?	236
5.4	Pour prolonger l'étude des événements extrêmes méditerranéens	241
5.5	L'utilisation des CP-RCMs pour les services climatiques?	242
5.6	Vers des modèles globaux à résolution kilométrique en climat?	243
	Bibliographie	245
	Glossaire	271
	Table des figures	274
	Liste des tableaux	281

Chapitre 1

Introduction

Sommaire

1.1	Les épisodes méditerranéens	2
1.1.1	L'épisode méditerranéen sur les Alpes-Maritimes des 2-3 octobre 2020	2
1.1.2	Qu'est-ce qu'un épisode méditerranéen ?	5
1.1.3	Tendance climatique passée des épisodes méditerranéens	16
1.2	Représentation des épisodes méditerranéens dans les modèles de climat	19
1.2.1	Par les modèles globaux de climat	19
1.2.2	Par une descente d'échelle statistique à partir des modèles globaux de climat	21
1.2.3	Par une descente d'échelle dynamique avec des modèles régionaux de climat	22
1.2.4	Les sources d'incertitudes des projections climatiques	27
1.2.5	Performance des modèles et notion de valeur ajoutée	29
1.2.6	Bilan : comparaison des outils de modélisation climatique pour l'étude des épisodes méditerranéens	31
1.3	Evolution future des pluies extrêmes méditerranéennes . . .	32
1.3.1	Evolution future du climat méditerranéen	32
1.3.2	Projections des pluies extrêmes méditerranéennes par les GCMs	34
1.3.3	Projections des pluies extrêmes méditerranéennes par les RCMs	36
1.3.4	Projections des pluies extrêmes méditerranéennes par les CP-RCMs	38
1.3.5	Le cadre de recherche européen pour les études avec des CP-RCMs	40
1.4	L'approche objet appliquée aux pluies extrêmes	42
1.5	Objectifs de la thèse et organisation du manuscrit	46
1.5.1	Objectifs	46
1.5.2	Questions scientifiques	48
1.5.3	Organisation du manuscrit	49

35 1.1 Les épisodes méditerranéens

36 1.1.1 L'épisode méditerranéen sur les Alpes-Maritimes des 2-3 37 octobre 2020

38 Au début du mois d'octobre 2020, le sud-est de la France a connu un épisode méditerra-
39 néen exceptionnel qui constitue un exemple typique des événements pluvieux extrêmes qui
40 touchent cette région (cf. Figure 1.1). Cet épisode lié à la tempête Alex s'est produit dans
41 les Alpes-Maritimes et a apporté localement des précipitations supérieures à 600 mm/24h
42 et jusqu'à 90 mm/h (Chochon et al, 2022; Kreitz, 2021). Des crues éclair d'une force rare
43 ont dévasté plusieurs vallées, notamment celles de la Vésubie, de la Roya et de la Tinée, et
44 ont entraîné des dommages humains et matériels considérables (18 victimes, des villages et
45 un réseau de communication ravagés, environ un milliard d'euros de dommages estimés).

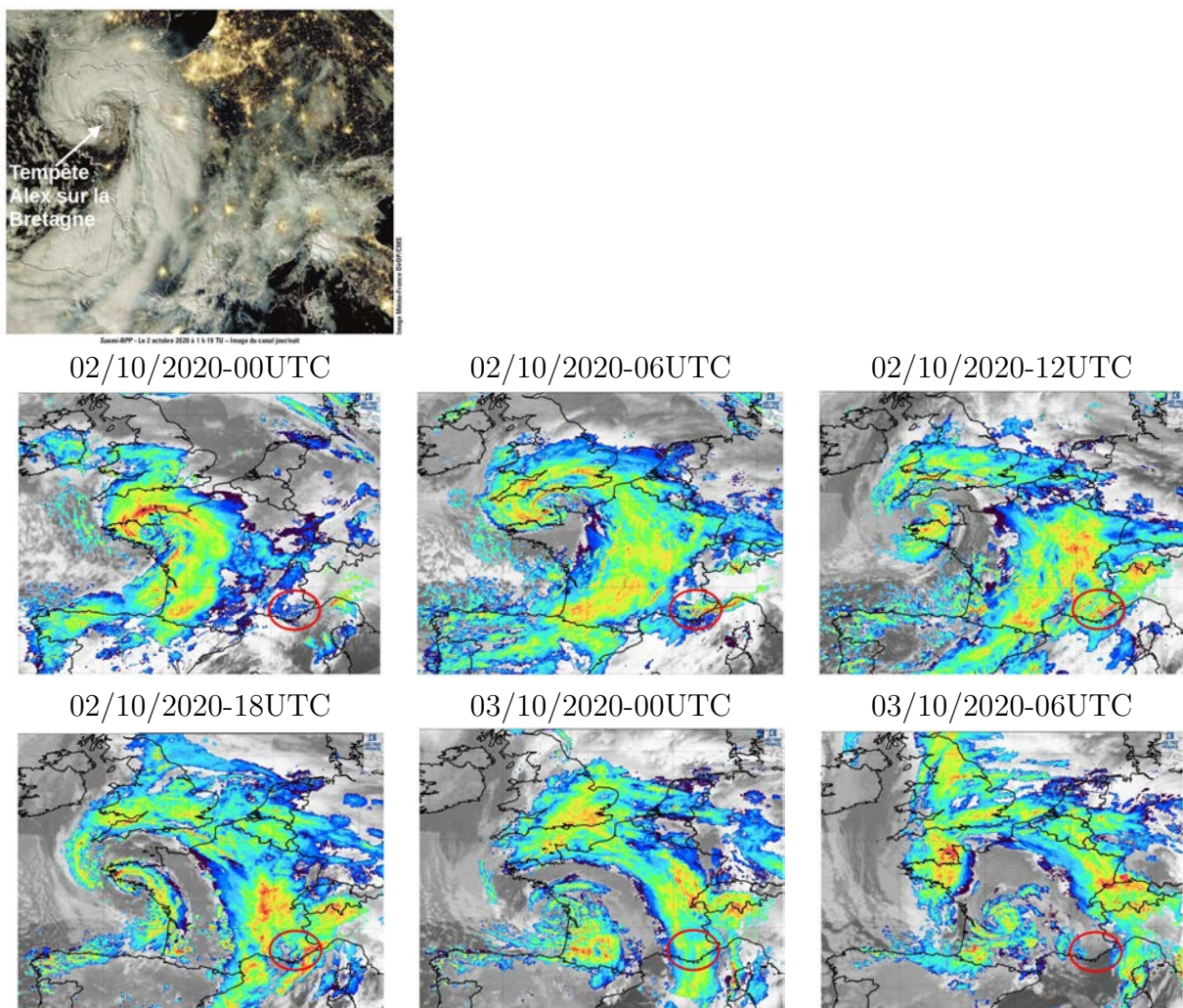


FIGURE 1.1 – La tempête Alex vue par le satellite Suomi-NPP le 2 octobre 2020 à 1h19 UTC, ainsi que l'épisode méditerranéen à travers les réflectivités radar superposées aux images satellitaires infrarouge toutes les six heures entre le 2 octobre 00 UTC et le 3 octobre 06 UTC

Situation météorologique

Une situation météorologique de grande échelle favorable et qui évolue lentement

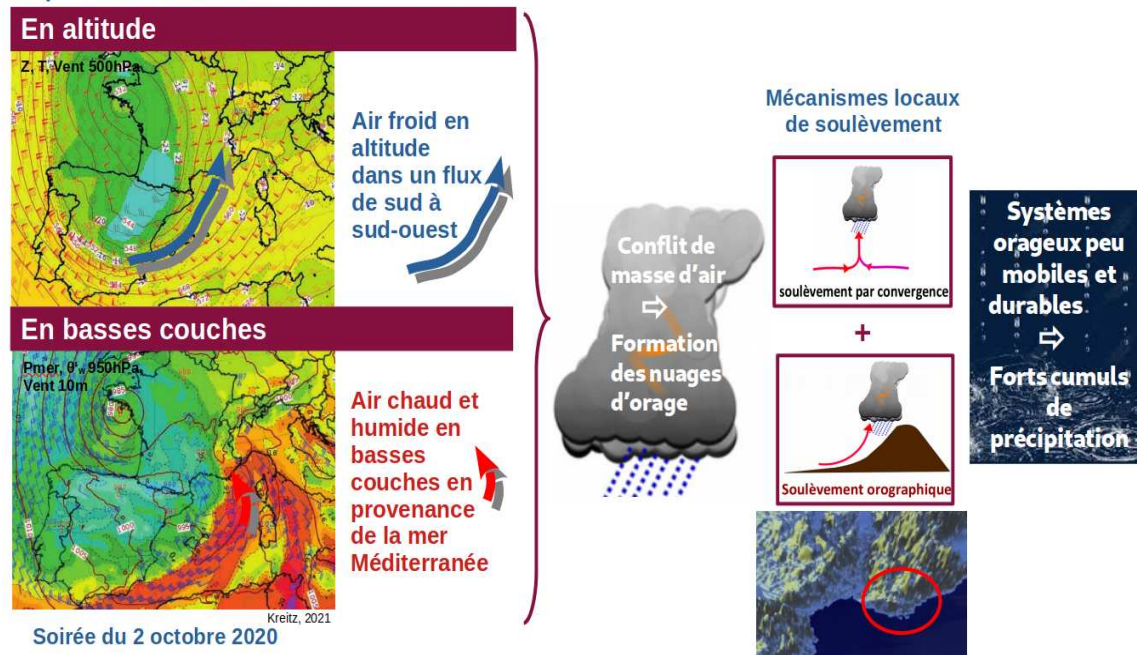


FIGURE 1.2 – Ingrédients et situation météorologique associés à l'épisode méditerranéen des 2-3 octobre 2020 sur les Alpes Maritimes

47 Dans la nuit du 1 au 2 octobre 2020 et pendant la journée du 2, la violente tempête
48 Alex touche l'ouest de la France avec un creusement explosif (chute de 40 hPa en 18 heures)
49 et des vents violents (jusqu'à 186 km/h à Belle-Île-en-Mer avec un possible sting jet). De
50 manière relativement classique à cette période de l'année, cette tempête est associée à une
51 goutte froide d'altitude qui évolue lentement et génère un flux de sud à sud-ouest sur le
52 sud de la France. En basses couches, de l'air chaud et humide est advecté en provenance
53 de la mer Méditerranée dans un flux de sud-sud-est. Les conditions sont réunies pour la
54 mise en place d'un épisode méditerranéen : le conflit de masse d'air génère de l'instabilité
55 et aboutit, dans la journée du 2 octobre, à la formation de systèmes convectifs organisés
56 qui apportent des précipitations intenses sur le sud-est de la France (cf. Figure 1.2). Les
57 très fortes intensités sur les Alpes-Maritimes s'expliquent par des mécanismes locaux de
58 soulèvement qui vont produire des systèmes convectifs peu mobiles et donc générer de
59 très forts cumuls de précipitation : un soulèvement orographique intense tout d'abord,
60 mais aussi un soulèvement lié à de la convergence forte en basses couches (c'est-à-dire
61 des flux d'air de basses couches qui se rejoignent et créent de l'ascendance). De plus,
62 comme la situation synoptique évolue lentement, le soulèvement et la convection sévère se
63 maintiennent sur la région toute la journée du 2. Ce n'est qu'en début de nuit que les plus
64 fortes intensités se décalent vers l'est, en raison du passage du front froid qui va évacuer
65 l'air chaud vers l'Italie.

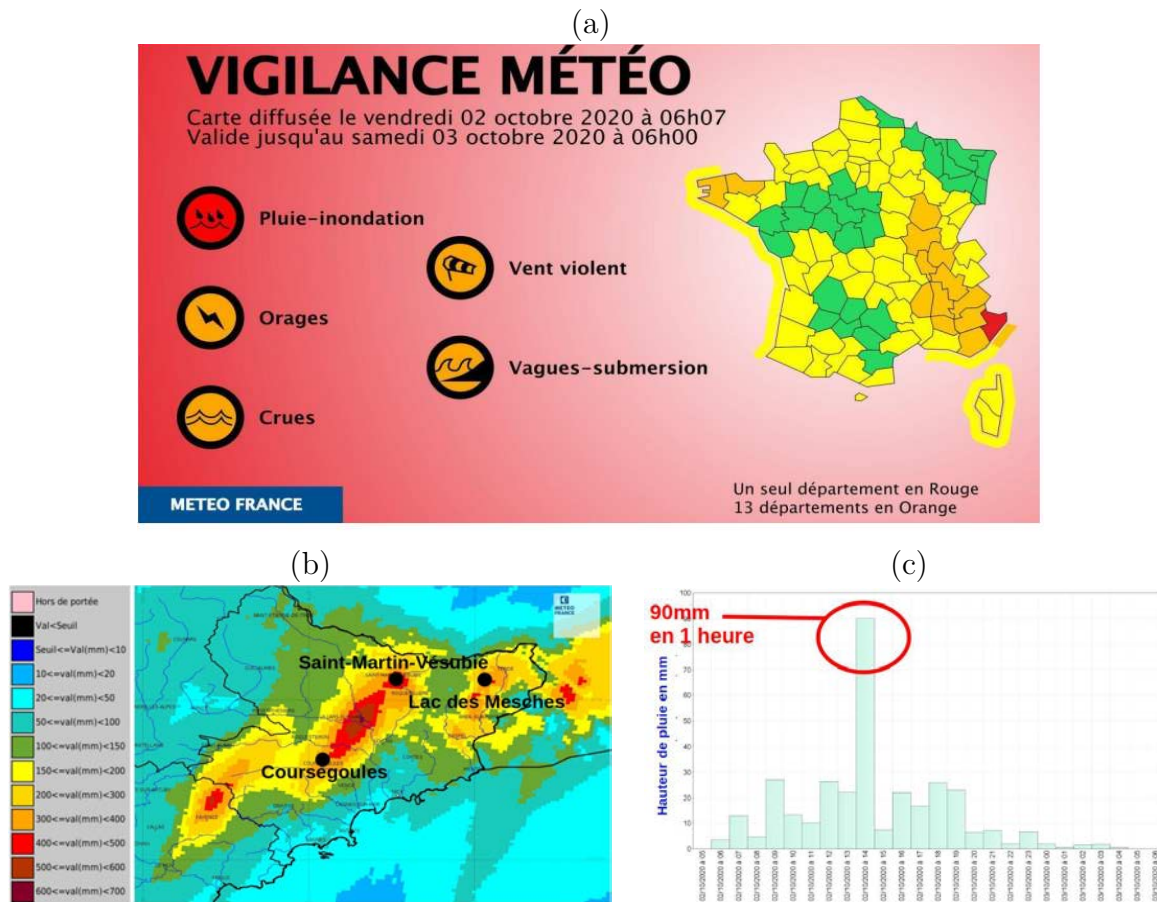


FIGURE 1.3 – (a) Carte de vigilance émise par Météo-France associée à l'épisode méditerranéen des 2-3 octobre 2020 ; (b) Cumuls de précipitation en 24h sur les Alpes-Maritimes entre le 2 octobre 06 UTC et le 3 octobre 06 UTC ; (c) Cumuls horaires de précipitation à la station de Coursegoules du 2 octobre 06 UTC au 3 octobre 06 UTC

67 Pour cet épisode exceptionnel, Météo-France a émis une vigilance rouge pluie-inondation
 68 et le SCHAPI (Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inonda-
 69 tions), une vigilance rouge crues (cf. Figure 1.3 a). Les cumuls en 24 heures, du 2 octobre de
 70 06 UTC au 3 octobre à 06 UTC, dépassent 300 mm dans l'intérieur des Alpes-Maritimes et
 71 500 mm à Saint-Martin-Vésubie, atteignant 663 mm au Lac des Mesches (cf. Figure 1.3 b).
 72 Les intensités horaires atteignent 90 mm à Coursegoules le 2 octobre à 13 UTC, dépassant
 73 la durée de retour centennale (cf. Figure 1.3 c). Plusieurs éléments aggravants s'ajoutent :
 74 des vents violents avec jusqu'à 161 km/h observés à Levens dans les Alpes-Maritimes, des
 75 fortes vagues qui empêchent l'écoulement des rivières dans la mer et l'absence de précipi-
 76 tation sous forme de neige en altitude car l'événement a lieu au début de l'automne. Ces
 77 pluies diluviennes provoquent des crues éclairs dans certaines vallées, notamment celles de
 78 la Vésubie, de la Roya et de la Tinée, avec des inondations et éboulements catastrophiques
 79 (cf. Figure 1.4).



FIGURE 1.4 – Les conséquences de l’épisode méditerranéen des 2-3 octobre 2020 sur les Alpes-Maritimes

80 1.1.2 Qu’est-ce qu’un épisode méditerranéen ?

81 L’événement des 2-3 octobre 2020 sur les Alpes-Maritimes constitue un exemple emblé-
 82 matique d’épisode méditerranéen. Il s’agit maintenant de définir de manière plus générale
 83 ces événements extrêmes.

84 1.1.2.1 Contexte : le climat méditerranéen

85 Sous l’influence de la mer Méditerranée et protégé par le relief (Pyrénées, Alpes et
 86 Massif Central) des masses d’air venues de l’Atlantique ou du Nord, le climat méditerra-
 87 néen français se caractérise par un ensoleillement important, des hivers doux et des étés
 88 chauds. Si les massifs montagneux constituent une barrière pour le temps perturbé venant
 89 de l’ouest, du nord-ouest ou du nord, le relief canalise le vent et la région est fréquemment
 90 concernée par des vents régionaux forts, comme le mistral ou la tramontane, qui peuvent
 91 s’accompagner de violentes rafales. Le régime de précipitation du climat méditerranéen est
 92 très particulier avec seulement 70 à 80 jours de pluies supérieures à 1 mm, voire moins lo-
 93 calement et irrégulièrement répartis dans l’année : les étés sont très secs, mais les automnes
 94 sont très arrosés (en moyenne, 40% du total annuel en 3 mois pour la période 1991-2020)
 95 en raison de la survenue d’épisodes méditerranéens, plus ou moins fréquents et intenses (cf.
 96 Figure 1.5).

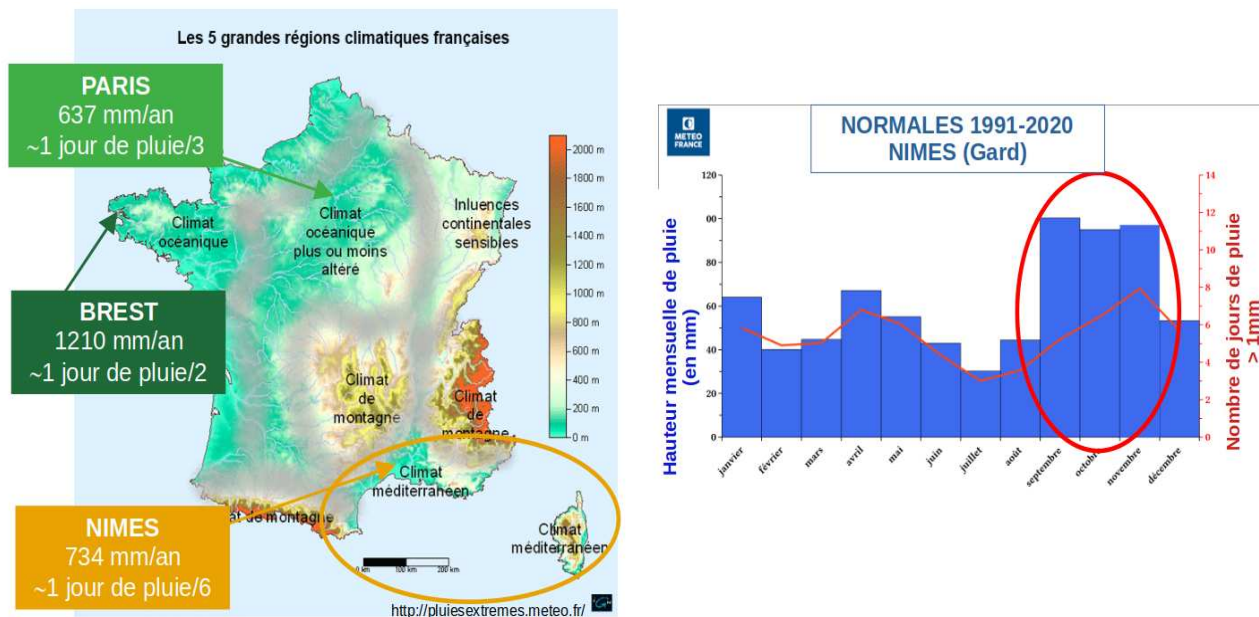


FIGURE 1.5 – Le climat méditerranéen parmi les régions climatiques françaises et les normales mensuelles de précipitation pour la période 1991-2020 pour la ville de Nîmes dans le Gard (hauteur en mm et nombre de jours de pluie > 1 mm)

97 1.1.2.2 Définition des épisodes méditerranéens

98 Trois à six fois par an en moyenne et le plus souvent à l’automne, des précipita-
 99 tions intenses touchent le nord-ouest de la Méditerranée, c’est-à-dire les régions de l’est
 100 de l’Espagne, du sud-est de la France, de l’Italie jusqu’à la Croatie. Elles apportent l’équi-
 101 valent de plusieurs mois de pluie en seulement quelques heures ou quelques jours, dépas-
 102 sant les 100 mm en moins de 24 heures, voire en quelques heures (Ducrocq et al, 2008;
 103 Nuissier et al, 2008, 2011; Khodayar et al, 2021). Associées à des systèmes orageux sou-
 104 vent quasi-stationnaires, ces pluies intenses entraînent des montées de cours d’eau très
 105 rapides ou crues éclairs dans des bassins versants méditerranéens souvent de petite taille.
 106 Elles sont à l’origine d’inondations et de glissements de terrain qui sont régulièrement la
 107 cause de dommages humains et matériels considérables (cf. Figure 1.6).

108 Ces événements répondent à la définition des événements extrêmes qui conjugue, en
 109 effet, une fréquence rare, des valeurs dépassant un seuil élevé et des impacts sur la popu-
 110 lation et/ou l’économie. La Figure 1.7 qui présente la climatologie des épisodes pluvieux
 111 français supérieurs à 200 mm en un jour illustre la rareté de ces événements extrêmes et
 112 montre qu’ils se limitent essentiellement, pour la France, au sud-est du pays.

113 Ces événements présentent également une grande variabilité interannuelle avec l’al-
 114 ternance d’années peu actives, comme 2012, ou très actives, comme 2014 (Vautard et al,
 115 2015). Ces phénomènes météorologiques sont appelés épisodes méditerranéens et pour cer-
 116 tains, épisodes cévenols; nous verrons par la suite comme les distinguer. En anglais, la
 117 terminologie Mediterranean Heavy Precipitation Event (HPE) est employée.

118 Le programme international HyMeX (Hydrological cycle in the Mediterranean Expe-
 119 riment, <https://www.hymex.org>, 2010-2020, Drobinski et al (2014); Ducrocq et al (2014)),



FIGURE 1.6 – Quelques épisodes méditerranéens marquants touchant le nord-ouest de la Méditerranée et la topographie de ces régions avec une mer intercontinentale presque entièrement fermée dont les côtes sont bordées de nombreux reliefs

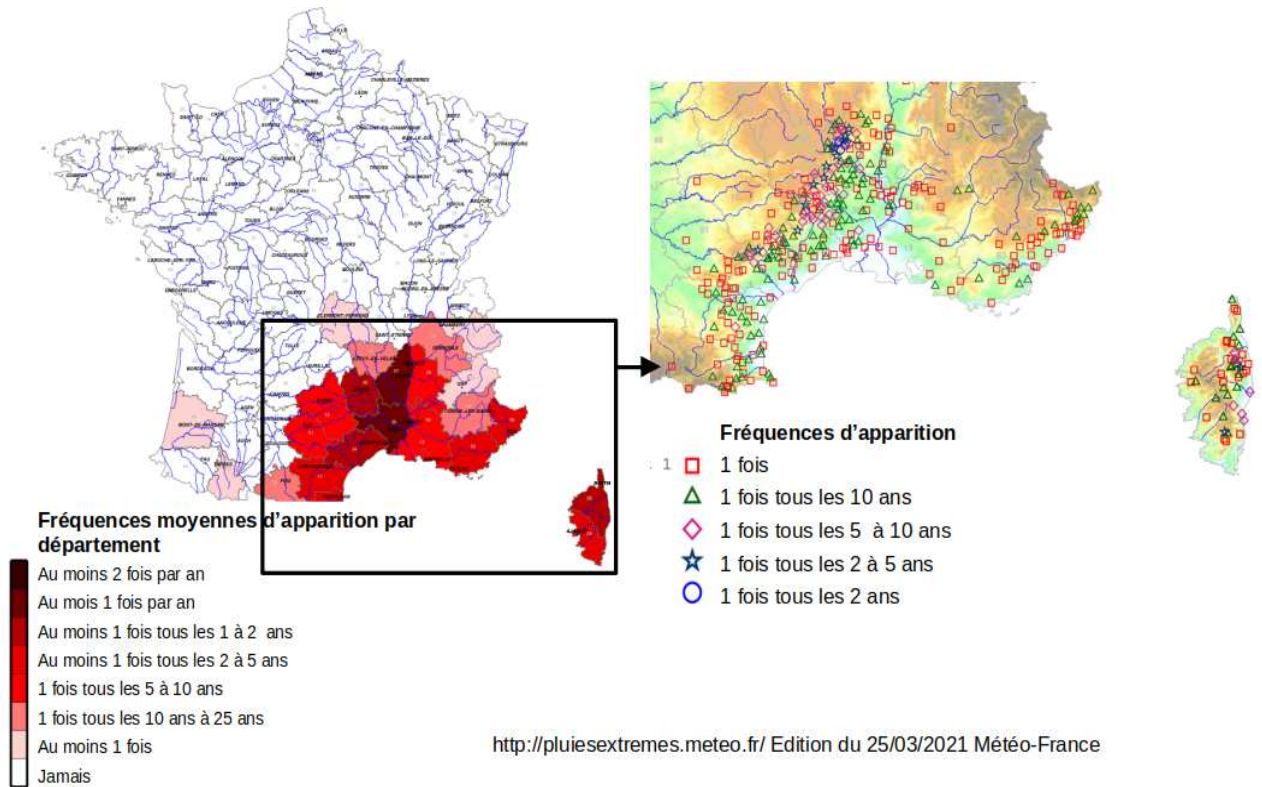


FIGURE 1.7 – Épisodes de plus de 200 mm en 1 jour pour la période 1971-2020 : fréquence par département sur la France métropolitaine et par station de mesure sur le sud-est du pays

120 initié et coordonné par Météo-France et le CNRS, a fortement contribué à améliorer l'ob-
 121 servation, la compréhension et la simulation numérique de ce type d'événements. Le but de
 122 ce programme rassemblant plus de 400 scientifiques de plus de 20 pays et rythmé par plu-
 123 sieurs campagnes de mesure (cf. Figure 1.8) était de mieux comprendre et prévoir le cycle
 124 de l'eau en Méditerranée dans un contexte de changement climatique, en améliorant les
 125 connaissances et la prévision des risques hydrométéorologiques (épisodes méditerranéens,

126 sécheresse). En particulier, les campagnes de mesure SOP1 et 2 ont permis d'étudier les
 127 mécanismes mis en jeu lors d'épisodes méditerranéens et ont donné lieu à de nombreuses
 128 études dont un bilan a été fait par Khodayar et al (2021).

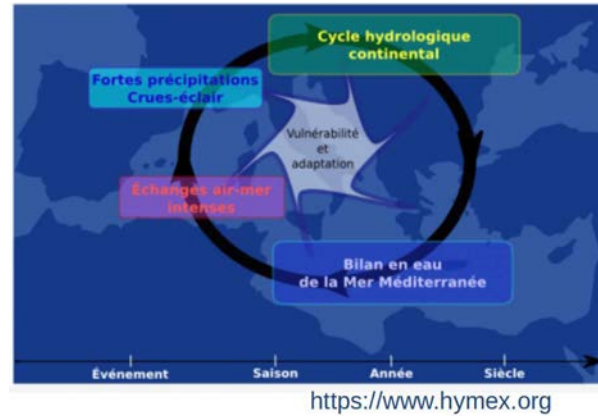
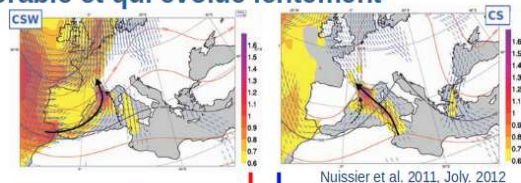


FIGURE 1.8 – Le programme international HyMeX et ses différentes campagnes de mesure

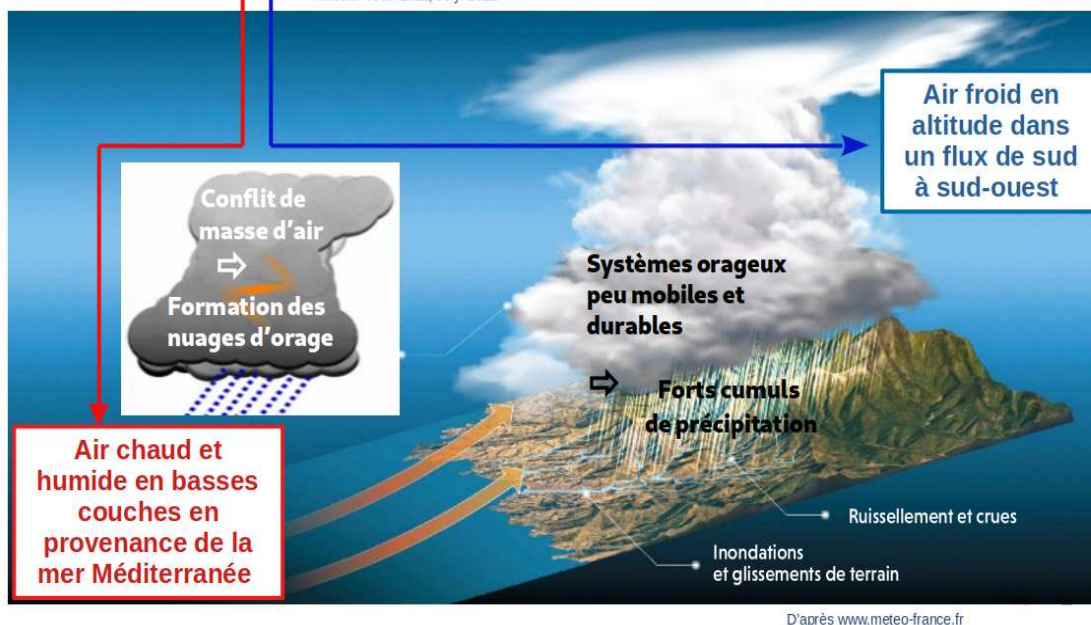
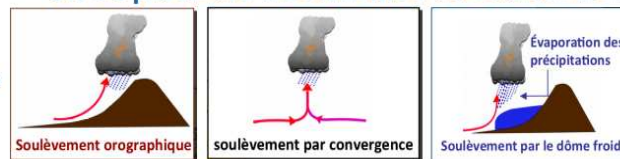
129 1.1.2.3 Les ingrédients météorologiques

130 Tout d'abord, des conditions météorologiques favorables au développement de l'activité
 131 pluvio-orageuse se mettent en place en Méditerranée (cf. Figure 1.9) : le plus souvent, il
 132 s'agit d'une zone de bas géopotential qui approche par l'ouest avec un thalweg ou une
 133 goutte froide et qui apporte de l'air froid en altitude dans un flux de sud-ouest à sud sur la
 134 Méditerranée occidentale : deux configurations favorables, Cyclonic SouthWesterly (CSW)
 135 et Cyclonic Southerly (CS), ont été mises en évidence par Nuissier et al (2011) et reprises
 136 par Joly et al (2012). Ce refroidissement en altitude va se combiner avec des remontées
 137 d'air chaud, humide et instable en basses couches qui proviennent majoritairement de la
 138 mer Méditerranée (Duffourg and Ducrocq, 2011, 2013; Krichak et al, 2015). On comprend
 139 ainsi que l'automne est la saison privilégiée pour ces événements, avec une atmosphère
 140 qui commence à se refroidir et une mer encore chaude, favorisant une forte évaporation en
 141 surface. L'étude climatologique de Ricard et al (2012) (cf. Figure 1.10 a) confirme que les
 142 épisodes méditerranéens français ont lieu essentiellement entre septembre et décembre. Le
 143 conflit de masse d'air entre l'air froid en altitude et l'air chaud en basses couches va générer
 144 de l'instabilité, à l'origine de mouvements verticaux intenses qui s'étendent à l'échelle de
 145 toute la troposphère et génèrent ainsi de la convection profonde : les masses d'air chaud

Une situation météorologique de grande échelle favorable et qui évolue lentement



Un ou plusieurs mécanismes de soulèvement



D'après www.meteo-france.fr

FIGURE 1.9 – La situation météorologique et les ingrédients associés aux épisodes méditerranéens (d'après www.meteo-france.fr)

146 et humide de basses couches vont être soulevées, c'est-à-dire qu'elles vont s'élever, se re-
 147 froidir par décompression adiabatique et via les échanges avec l'air environnant, et que
 148 la grande quantité de vapeur d'eau qu'elles contiennent va se condenser pour former des
 149 nuages d'orage, avant de tomber sous forme de fortes précipitations. Les très forts cumuls
 150 de précipitation observés lors des épisodes méditerranéens s'expliquent par le caractère
 151 souvent stationnaire des systèmes convectifs (Goulet, 2015). Pour que les orages se régé-
 152 nèrent plusieurs heures au-dessus de la même région, plusieurs mécanismes entrent en jeu
 153 et peuvent se combiner :

- 154 • le soulèvement orographique : le Massif-Central, les Pyrénées, les Alpes ou la mon-
 155 tagne corse sont autant de barrières montagneuses sur lesquelles la masse d'air chaud
 156 peut venir buter et se soulever. Les épisodes cévenols sont un exemple typique de ce
 157 type de soulèvement avec de très forts cumuls de précipitation possibles en quelques
 158 jours sur les Cévennes ou leur piémont. Alors qu'il correspond aux cas de soulèvement
 159 dû à ce relief, le qualificatif « cévenol » est d'ailleurs souvent employé abusivement
 160 pour caractériser tout épisode de pluies diluviennes touchant le sud-est de la France ;
- 161 • le soulèvement lié à des zones de convergence du vent près de la surface, souvent liées
 162 à la présence de relief et qui engendrent des mouvements ascendants stationnaires
 163 (Ducrocq et al, 2008; Nuissier et al, 2008; Bresson et al, 2009) ;

164 • le soulèvement lié à la présence de bulles d'air froid de surface qui apparaissent
 165 essentiellement en raison de l'évaporation des précipitations sous l'orage lui-même
 166 (Ducrocq et al, 2008; Bresson et al, 2012). Ces dômes froids ou plages froides (cold
 167 pool en anglais) vont agir comme un relief en soulevant la masse d'air toujours au
 168 même endroit.

169 Ces deux derniers mécanismes correspondent à des systèmes orageux qui peuvent toucher
 170 des zones de plaine, dès le littoral. Les orages associés peuvent s'accompagner de très
 171 fortes intensités de précipitation, atteignant ou dépassant parfois les 100 mm/h. Un forçage
 172 dynamique en altitude, c'est-à-dire une anomalie de tropopause, souvent associé au passage
 173 d'un front, peut venir également renforcer la convection. Son décalage vers l'est marque
 174 souvent la fin de l'épisode.

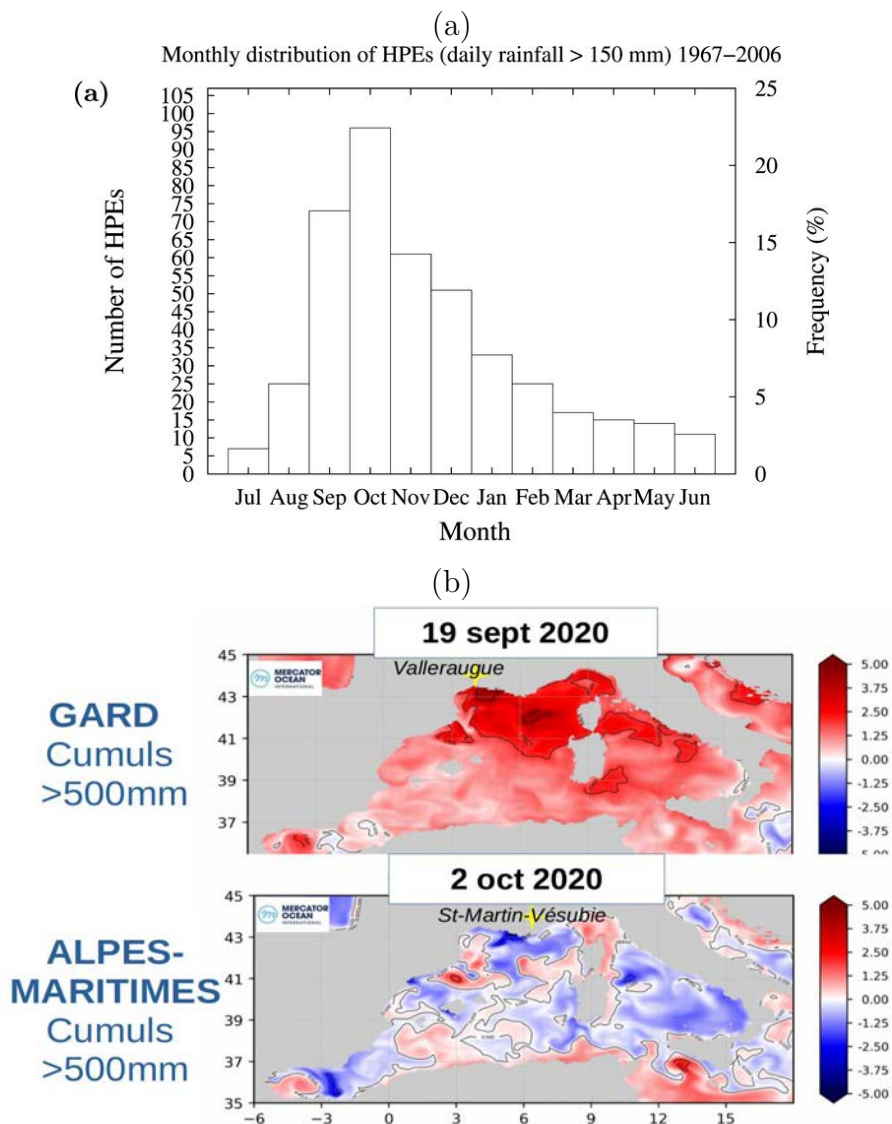


FIGURE 1.10 – (a) Distribution mensuelle du nombre de HPEs supérieurs à 150 mm sur le sud de la France pour la période 1967-2006 (Ricard et al, 2012); (b) Ecart à la normale des températures de surface de la mer dans le cas de deux épisodes méditerranéens d'octobre 2020 associés à des cumuls supérieurs à 500 mm (Ducrocq, 2020)

175 Il faut aussi préciser que la mer Méditerranée n'est pas la seule source d'humidité pour
176 alimenter les systèmes convectifs méditerranéens (Duffourg and Ducrocq, 2011). En effet,
177 par le calcul des bilans d'eau pour quatre épisodes méditerranéens typiques, Duffourg and Ducrocq
178 (2013) ont montré que l'évaporation de la mer contribue pour moitié environ (40-60%) à la
179 quantité de vapeur d'eau alimentant le système orageux, alors que 45 à 20% du transport
180 d'humidité provient de l'Atlantique et 15 à 20% est exporté depuis les Tropiques.

181 Plusieurs études montrent l'importance des échanges de flux air-mer lors de ces épi-
182 sodes de pluies intenses (Lebeaupin Brossier et al, 2008; Rainaud et al, 2017) et le lien
183 qui peut être fait entre les températures de surface de la mer (ou SST pour Sea Surface
184 Temperature) et l'intensité et/ou la localisation des précipitations. Ainsi, en s'intéressant
185 à trois épisodes méditerranéens français de référence, Lebeaupin et al (2006) démontrent
186 l'importance significative des SSTs sur la convection : une augmentation (une diminution)
187 de plusieurs degrés de la valeur moyenne des SSTs provoque une intensification (un affai-
188 blissement, voire un arrêt) de la convection et joue également un rôle sur la localisation
189 et la possible stationnarité des systèmes convectifs. De même, Berthou et al (2014, 2016)
190 démontrent l'existence d'une relation linéaire statistiquement significative entre les diffé-
191 rences de SST et les différences de précipitation pour plusieurs événements touchant les
192 Cévennes, la région de Valence en Espagne et la Calabre en Italie : plus les différences de
193 SST dans la zone amont sont importantes, plus les différences de précipitation le sont aussi,
194 quelque soit leur signe. Berthou et al (2015) étudient, en particulier, le rôle d'un épisode
195 de mistral précédant un événement précipitant qui, par la création d'une anomalie froide
196 de SST dans le Golfe du Lion, modifie les zones de convergence de vent de basses couches,
197 augmente la stabilisation des masses d'air et renforce l'effet de blocage par les Alpes, avec
198 un impact sur les précipitations de l'épisode méditerranéen et leur positionnement.

199 Toutefois, il n'est pas possible de relier de manière univoque la température de la
200 mer et l'intensité des précipitations : une température de la mer élevée favorise, en effet,
201 l'évaporation, mais d'autres paramètres sont également à prendre en compte comme le vent,
202 l'humidité et le temps de résidence au dessus de la mer (Ducrocq, 2020). Par exemple, pour
203 deux épisodes de l'automne 2020 dont les cumuls de précipitation dépassent les 500 mm,
204 les écarts à la normale des températures de surface de la mer étaient positifs pour le cas
205 du Gard du 19 septembre et négatifs, à la suite d'un épisode de Mistral, pour le cas des
206 Alpes-Maritimes des 2-3 octobre (cf. Figure 1.10 b).

207 **1.1.2.4 L'organisation de la convection**

208 Dans le cas des épisodes méditerranéens, les nuages générés par l'instabilité convective
209 peuvent se rassembler et s'organiser à plus grande échelle. Typiquement, les cellules ora-
210 geuses de petite échelle peuvent se rassembler à un instant donné en orage multicellulaire
211 (composé de plusieurs cellules), ou adopter la forme d'un orage supercellulaire (composé
212 d'une cellule unique et autonome, pouvant durer plusieurs heures) qui est la structure ora-
213 geuse la plus virulente et la plus dangereuse de toutes. Lorsqu'un ensemble d'orages couvre
214 une portion de territoire importante et produit des précipitations convectives sur au moins
215 100 km à échelle horizontale (Houze Jr, 2014), on parle de systèmes convectifs de méso-
216 échelle (ou Mesoscale Convective Systems (MCSs), Hernandez et al (1998); Ducrocq et al

217 (2008)). Les cellules convectives peuvent s'organiser en ligne étroite de 10-20 km sur une à
218 plusieurs centaines de kilomètres avec une propagation rapide (10-20 m/s) : on parle alors
219 de ligne de grains. Si l'organisation prend une signature arquée au niveau des réflectivités
220 radar, on parle alors de systèmes arqués (ou bow échos) qui s'accompagnent généralement
221 de vents très forts. Les MCSs peuvent également former des cellules en V, nom donné par la
222 forme en V visible sur les images satellitaires infrarouge : ce type d'organisation convective
223 à formation rétrograde ou en série est fréquente dans le sud-est de la France (Ducrocq et al,
224 2003) et se caractérise par un système orageux formé de cellules individuelles qui se ré-
225 génèrent plus ou moins au même endroit et dérivent ensuite dans le flux atmosphérique
226 (cf. Figure 1.11). Comme ils se reforment continuellement au même endroit, ces orages à
227 formation rétrograde apportent des pluies diluviennes.

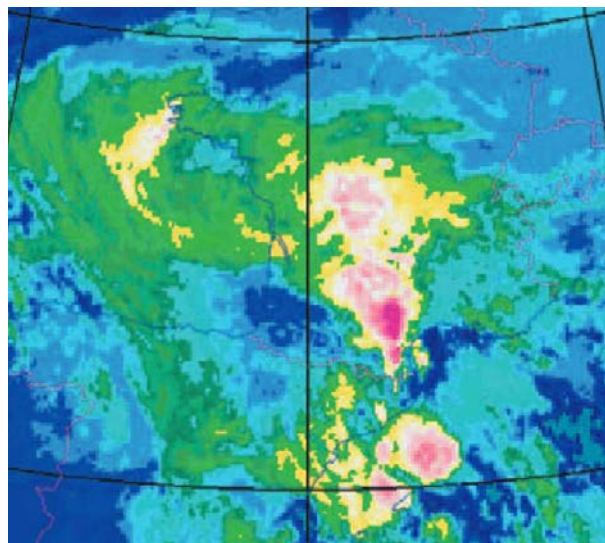


FIGURE 1.11 – Illustration de cellule en V, forme prise par le système nuageux s'étendant des Pyrénées-Orientales à l'ouest du Massif central avec l'image infrarouge Météosat du 12 novembre 1999 à 23 UTC (Ducrocq et al, 2003)

228 Un épisode méditerranéen peut être constitué de l'association ou de la succession de
229 plusieurs systèmes convectifs de différents types (Duffourg et al, 2016).

230 En plus des précipitations intenses, ces systèmes convectifs peuvent également s'accom-
231 pagner d'une forte activité électrique, de fortes rafales de vent, voire très localement de
232 tornades et parfois de grêle. Lorsqu'ils sont liés à des tempêtes marines, ils peuvent égale-
233 ment entraîner des submersions sur le littoral. En effet, le vent tempétueux en mer et dirigé
234 vers la côte peut générer de très fortes vagues et une surélévation temporaire du niveau de
235 la mer (surcote), la conjonction de ces deux phénomènes générant des submersions sévères
236 sur le littoral exposé. Cela peut également empêcher l'écoulement des rivières et aggraver
237 le risque d'inondation.

238 1.1.2.5 Cas marquants

239 De par la configuration particulière de ces régions, les épisodes méditerranéens ont sans
 240 doute existé depuis toujours. On peut noter quelques exemples anciens, comme l'épisode
 241 cévenol de septembre 1890 en Ardèche avec 971 mm mesurés en cinq jours ou l'aiguat
 242 d'octobre 1940 dans les Pyrénées-Orientales avec un cumul de précipitation de 1000 mm
 243 relevé en une journée à Saint-Laurent-de-Cerdans qui constitue le record de précipitation
 244 en 24 heures sur la France métropolitaine. Le sud-est de la France détient également le
 245 record de précipitation en une heure pour la France métropolitaine avec 160 mm relevé
 246 à Torreilles dans les Pyrénées-Orientales en octobre 1986. Le tableau ci-après liste les
 247 principaux épisodes méditerranéens qui ont touché le sud-est de la France depuis les années
 248 1980 et indique les cumuls de pluie associés, ainsi que leur durée et le nombre de victimes
 249 (Goulet, 2015).



Nîmes 1988 © F3 LR



Corbières 1999
©Pascal Pavani/AFP



Cannes 2015
©Nice Matin

Lieu	Date	Cumul de pluie (mm)	Durée	Victimes
Nîmes (Gard)	3 oct 1988	420	6 à 9h	11
Vaison-la-Romaine (Vaucluse)	22 sept 1992	300	3 à 4h	34
Corse orientale	31 oct-1er nov 1993	780	24h	7
Lézignan-Corbières (Aude)	12-13 nov 1999	551	12h	26
Anduze (Gard)	8-9 sept 2002	683	24h	24
Draguignan (Var)	15 juin 2010	460	12 à 15h	25
Cannes (Alpes-Maritimes)	3 oct 2015	175	2h	20
Trèbes (Aude)	14-15 oct 2018	295	12h	14
Alpes-Maritimes	2-3 oct 2020	500	24h	20



Vaison la Romaine 1992
©ina.fr



Draguignan 2010
© Météo-France



Trèbes 2018
© Sylvain Thomas

D'après Goulet 2015

250 Davantage d'information sur les épisodes méditerranéens français les plus remarquables
 251 observées peut être trouvée sur le site <http://pluiesextremes.meteo.fr/>.

252 1.1.2.6 La modélisation et la prévision des épisodes méditerranéens

253 Compte-tenu des dommages catastrophiques qu'ils peuvent entraîner, la modélisation
 254 des épisodes méditerranéens constitue un enjeu majeur. Encore délicate parfois en termes
 255 de localisation précise et d'intensité, leur prévision s'est améliorée ces dernières années grâce
 256 à une meilleure compréhension des phénomènes et la mise en place de schémas conceptuels
 257 par les prévisionnistes, mais également grâce à l'évolution des outils numériques de prévision
 258 et de suivi de ces épisodes.

259 Pour modéliser les phénomènes météorologiques et leur évolution, des modèles numé-
 260 riques ont été développés : il s'agit d'ensembles complexes de programmes informatiques
 261 qui simulent le comportement de l'atmosphère, représentée par ses principaux paramètres
 262 (température, pression, vent, humidité) qui évoluent au cours du temps en une multitude

263 de points (maillage tridimensionnel en « boîte » de l'atmosphère). On peut également défi-
 264 nir leur résolution, c'est-à-dire, la distance entre le centre de deux « boîtes » élémentaires.
 265 Les premiers modèles qui ont commencé à tourner sur des calculateurs numériques dans les
 266 années 1950 étaient fondés sur des équations simplifiées et leur résolution était grossière.
 267 Au fil des ans et des progrès techniques, les modèles météorologiques se sont peu à peu
 268 complexifiés, permettant notamment de mieux représenter des phénomènes d'échelle plus
 269 petite et d'augmenter leur résolution. Mais chaque modèle numérique repose toujours sur
 270 des hypothèses plus ou moins nombreuses pour poser et résoudre les équations de la dy-
 271 namique, ainsi que des paramétrisations plus ou moins sophistiquées pour les phénomènes
 272 physiques concernant les échanges radiatifs, les échanges avec la surface ou encore les phé-
 273 nomènes sous-maille qui ne sont pas résolus par la dynamique. Ces simplifications plus ou
 274 moins nombreuses dans les modèles permettent d'aborder la notion d'incertitude modèle,
 275 qui sera précisée dans la Section 1.2.4.

276 Depuis les années 1990, des modèles à haute résolution et permettant la convection pro-
 277 fonde ont commencé à être développés en mode recherche tel que le modèle WRF (Weather
 278 Research and Forecasting, Skamarock (2008)) ou le modèle Méso-NH (Lafore et al, 1998).
 279 Les études rendues possibles grâce à ces nouveaux modèles ont joué un rôle très important
 280 pour mieux comprendre les processus atmosphériques de petite et méso-échelle et dévelop-
 281 per les modèles de Prévision Numérique du Temps (PNT) utilisés en opérationnel pour
 282 prévoir les phénomènes météorologiques associés. En particulier, à Météo-France, suite aux
 283 épisodes méditerranéens dramatiques survenus dans les années 1990, il a été décidé, dans
 284 les années 2000, de développer un modèle de PNT à haute résolution et à aire limitée
 285 sur la France, le modèle AROME qui est établi, pour la partie physique, sur les avancées
 286 du modèle Méso-NH et pour la dynamique, sur le cœur non-hydrostatique d'ALADIN.
 287 Les modèles de PNT utilisés auparavant avaient une résolution spatiale sur la France de
 288 l'ordre de 35 km dans les années 1990, puis de 10 km au début des années 2000. Or plu-
 289 sieurs études (Ducrocq et al, 2002; Richard et al, 2007; Gustafsson et al, 2018) ont montré
 290 que, pour prévoir correctement les épisodes méditerranéens, il était nécessaire d'augmen-
 291 ter la résolution spatiale des modèles, ainsi qu'intégrer de nouvelles données d'observation
 292 pour une meilleure initialisation. Le modèle AROME opérationnel depuis 2008 (Seity et al,
 293 2011) avec d'abord une résolution horizontale de 2.5 km (1.3 km depuis 2015) a permis des
 294 progrès importants pour modéliser et prévoir ces phénomènes extrêmes.

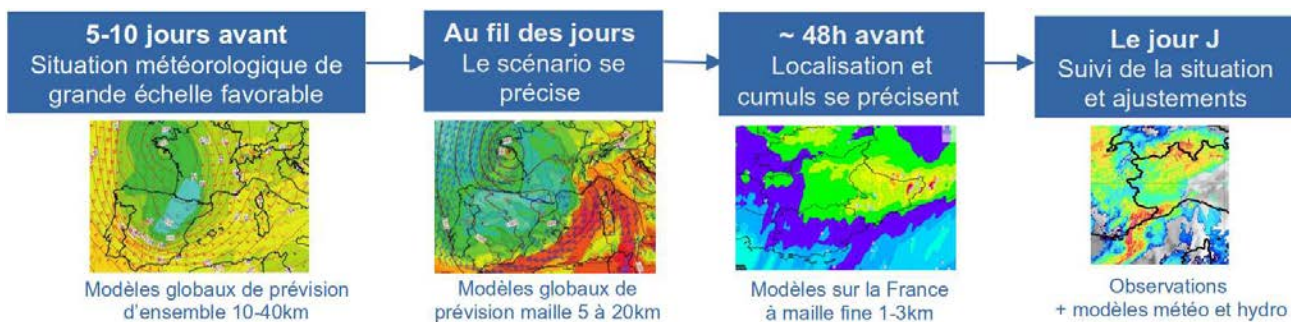


FIGURE 1.12 – Les étapes de prévision d'un épisode méditerranéen au fil des échéances

295 En pratique, à Météo-France, les prévisionnistes peuvent reconnaître une situation
 296 synoptique favorable à la survenue d'un épisode méditerranéen environ une semaine à
 297 l'avance, mais sans pouvoir donner de précision (cf. Figure 1.12). Ils utilisent pour cela des
 298 modèles globaux de prévision d'ensemble. Au fil des jours et des sorties de modèles globaux,
 299 puis de modèles à aire limitée avec des résolutions de plus en plus fines, le scénario va se
 300 préciser. S'il s'agit d'un épisode cévenol où le relief joue un rôle prépondérant, la prévisibi-
 301 lité est souvent plus grande. Dans les autres cas, il faut souvent attendre les derniers jours
 302 et les sorties du modèle AROME disponibles à 51h d'échéance pour commencer à préciser
 303 localisation et cumuls attendus et produire la carte de vigilance. Enfin, lorsque l'événement
 304 se met en place, les prévisionnistes en assurent le suivi en temps réel grâce aux imageries
 305 satellitaires et radars et aux cumuls observés de précipitation qui permettent d'affiner la
 306 prévision ou l'amender si nécessaire.

307 1.1.2.7 Les coûts des épisodes méditerranéens

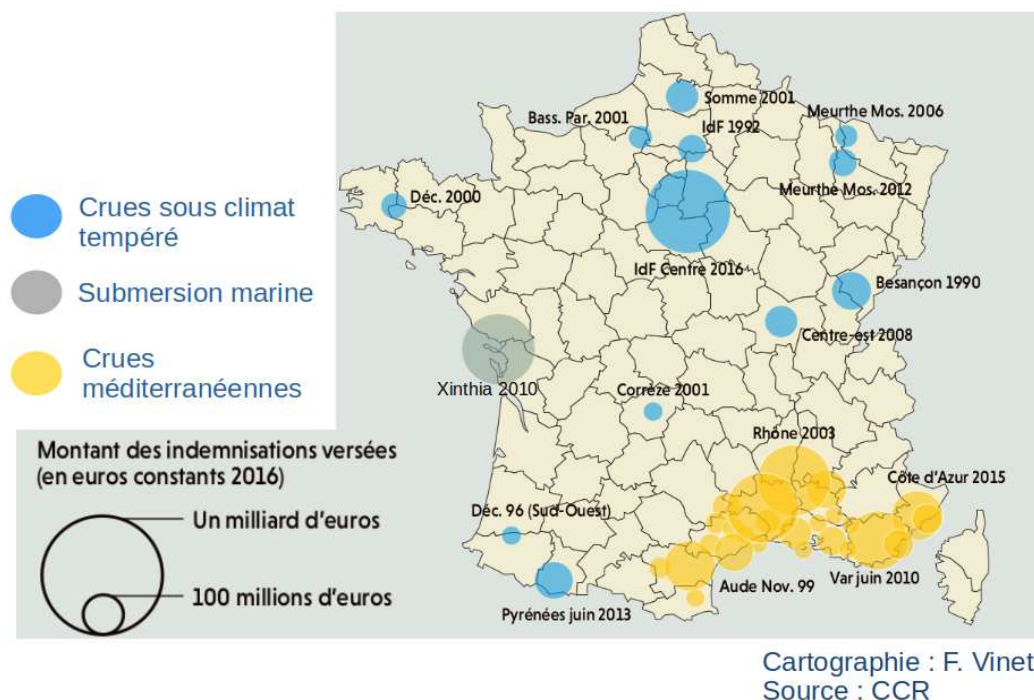


FIGURE 1.13 – Coûts des dégâts dus aux inondations pour les assureurs entre 1989 et 2016 pour les sinistres supérieurs à 50 millions d'euros

308 Les épisodes méditerranéens sont des événements météorologiques à fort impact (appe-
 309 lés High Impact Weather Events - HIWEs). En effet, ils ont des conséquences hydrologiques
 310 et géologiques avec des crues éclairs et des glissements de terrain qui peuvent entraîner des
 311 dommages humains et matériels considérables. Ainsi, les crues méditerranéennes consti-
 312 tuent 66% des remboursements des assureurs pour les inondations en France entre 1989
 313 et 2016, soit 5,8 milliards d'euros. Si on y ajoute les dommages agricoles et infrastruc-
 314 tures, le coût peut être estimé à 11 milliards d'euros en 28 ans (cf. Figure 1.13). Si la zone
 315 méditerranéenne a de tout temps été touchée par des épisodes de précipitations extrêmes,

316 on constate une augmentation des dégâts ces dernières décennies, liée à l'augmentation de
 317 la vulnérabilité au sens de l'exposition au risque, et des enjeux dans les zones à risque.
 318 En effet, depuis une soixantaine d'années, habitations, zones d'activités et réseaux se sont
 319 développés en fond de vallée et en zone côtière, accompagnant une augmentation de la po-
 320 pulation de 239 millions d'habitants en 1960 à 522 millions en 2020 pour les pays riverains
 321 de la mer Méditerranée, soit 6,7% de la population mondiale¹.

322 L'impact de ces épisodes méditerranéens souligne l'importance sociétale de mieux com-
 323 prendre ces événements météorologiques pour mieux les prévoir, mais avec un climat qui
 324 change, il est également nécessaire de les étudier aux échelles climatiques passées et futures.

325 1.1.3 Tendence climatique passée des épisodes méditerranéens

326 Le changement climatique impacte déjà le climat français avec une hausse observée des
 327 températures moyennes de +1,8°C depuis 1900 (cf. Figure 1.14 pour la ville de Perpignan),
 328 l'augmentation de la fréquence des vagues de chaleur, l'assèchement du sol et l'accentuation
 329 de l'intensité des sécheresses. Mais qu'en est-il des épisodes méditerranéens ?

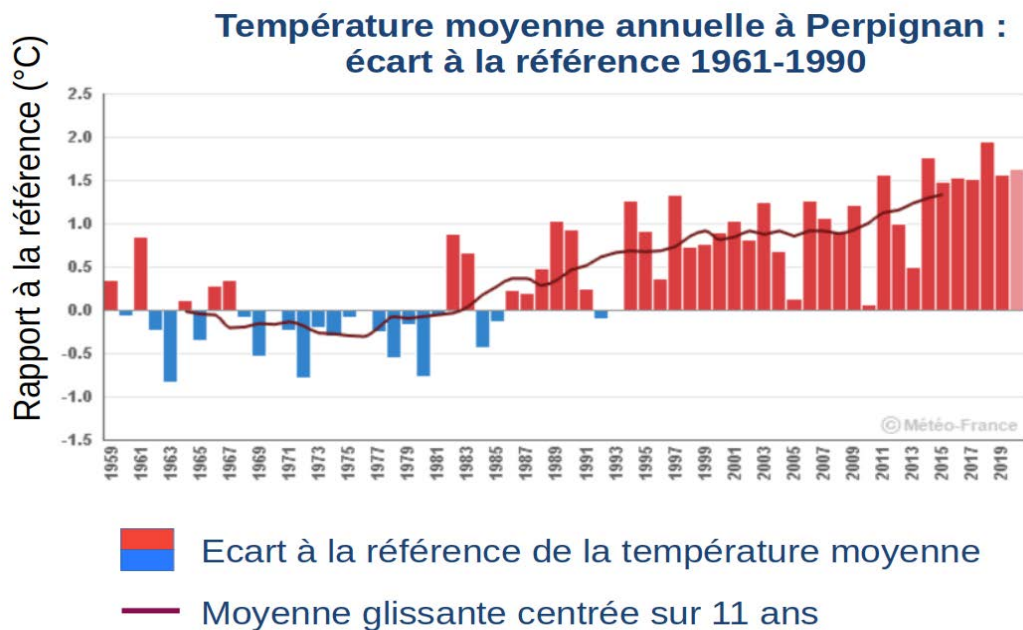


FIGURE 1.14 – Écart à la référence 1961-1990 des températures moyennes annuelles pour la ville de Perpignan pour la période 1959-2020

330 Le dernier et sixième rapport du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur
 331 l'Evolution du Climat) AR6 WG1 (Seneviratne et al, 2021) indique que l'on peut s'at-
 332 tendre à une intensification globale des précipitations quotidiennes extrêmes en réponse au
 333 réchauffement, suivant la loi de Clausius-Clapeyron (CC) établie en 1834 et donc de l'ordre
 334 de +7% pour 1°C supplémentaire. En effet, cette loi de thermodynamique indique que la

1. Plan Bleu : <https://planbleu.org/wp-content/uploads/2020/10/Note-de-synthese-38-Tendances-demographiques-Plan-Bleu.pdf>

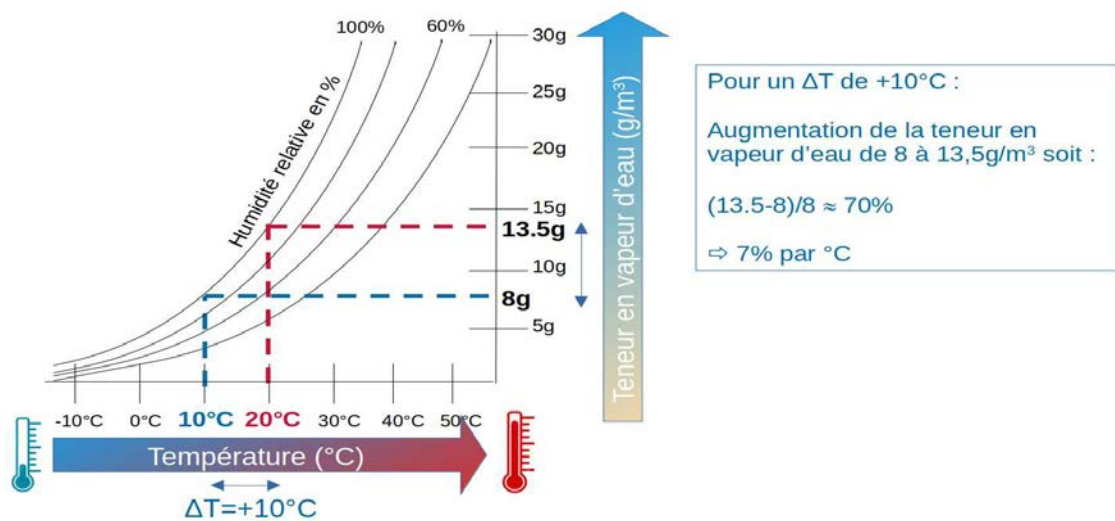


FIGURE 1.15 – Illustration de la loi de Clausius-Clapeyron

335 capacité de rétention en eau de l'atmosphère augmente de manière exponentielle avec la
 336 température (cf. Figure 1.15) et peut s'appliquer aux précipitations extrêmes. Néanmoins,
 337 cet effet thermodynamique peut être dans certaines régions contrecarré par un effet dy-
 338 namique qui conduit à renforcer la subsidence de grande échelle, notamment dans les
 339 régions subtropicales (Pfahl et al, 2017). A l'inverse, des effets dynamiques de méso-échelle
 340 peuvent induire une amplification des vitesses verticales dans les systèmes convectifs et
 341 ainsi aboutir à un accroissement des précipitations extrêmes bien au delà de 7% par degré
 342 de réchauffement atmosphérique.

343 A l'échelle du bassin méditerranéen, il n'y a pas consensus sur les changements observés
 344 des pluies extrêmes et leur attribution (Seneviratne et al, 2021). De plus, les changements
 345 de précipitation, en particulier de précipitations extrêmes, sont plus difficiles à analyser
 346 que les changements de température, du fait de la grande variabilité dans l'espace et dans
 347 le temps du champ de précipitation. Pour appréhender correctement ces changements,
 348 il est en effet nécessaire d'avoir un réseau dense de pluviomètres, ainsi que de longues
 349 séries de mesure, ce qui n'est pas partout le cas sur cette région. Sur le domaine mé-
 350 diterranéen français qui bénéficie d'un réseau d'observation satisfaisant, plusieurs études
 351 (Vautard et al, 2015; Blanchet et al, 2018; Ribes et al, 2019; Blanchet and Creutin, 2022)
 352 s'accordent sur une augmentation observée et potentiellement induite par l'homme (Luu,
 353 2020) de l'intensité et de la fréquence des épisodes méditerranéens depuis le milieu du 20e
 354 siècle. En particulier, en s'appuyant sur un réseau de 96 stations de mesure, Ribes et al
 355 (2019) montrent une intensification des extrêmes de précipitations quotidiennes (RX1day :
 356 maximum annuel de précipitation quotidienne) autour de +22% [+7; +39] entre 1961 et
 357 2015, ainsi qu'une augmentation de la fréquence des épisodes méditerranéens les plus forts
 358 (plus de 200 mm/j) de 2,7 fois [1,4; 5,4] (cf. Figure 1.16). La surface affectée par ces mêmes
 359 événements supérieurs à 200 mm a été multipliée par 3,6 [1,5; 9,1], tandis que le volume de
 360 précipitation au-delà de ce seuil a été multiplié par un facteur de 4,1 [1,6; 11]. Les grandes
 361 plages d'incertitude à 90% peuvent en partie être reliées à la forte variabilité interannuelle
 362 de ces phénomènes extrêmes.

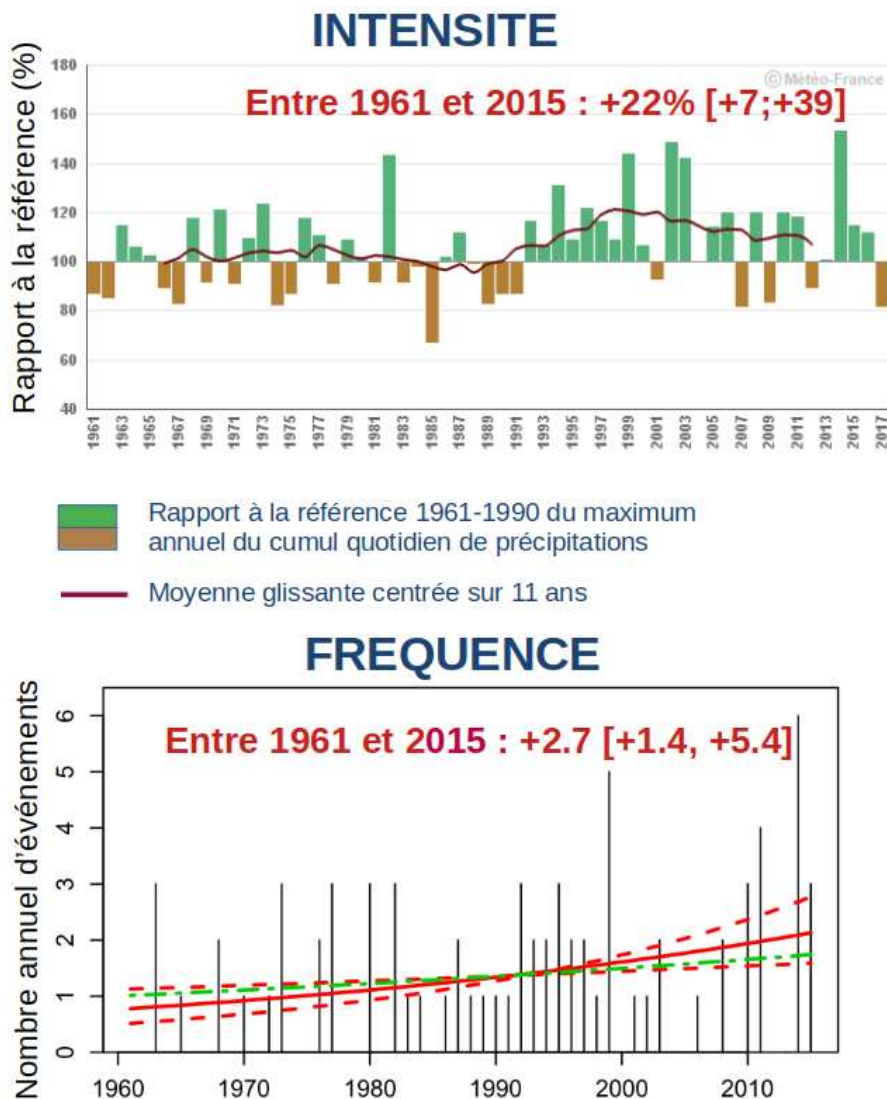


FIGURE 1.16 – Evolution de l'intensité des pluies extrêmes en région méditerranéenne entre 1961 et 2017 adapté de Ribes et al (2019) et de la fréquence d'événements supérieurs à 200 mm/j (Ribes et al, 2019)

363 De même, sur la période 1958-2020, Blanchet and Creutin (2022) rapportent une aug-
 364 mentation d'un ordre de grandeur similaire, soit environ +18% depuis 1960 pour la moyenne
 365 des maxima quotidiens annuels et +22% pour les valeurs de durée de retour de 20 ans en
 366 utilisant une distribution suivant la loi généralisée des extrêmes (non-stationary Generali-
 367 zed Extreme Value (GEV) distribution). Si l'on compare au réchauffement régional observé
 368 (+1.8°C), ces changements vont dans le sens d'une augmentation plus forte que la réponse
 369 attendue de Clausius-Clapeyron, ce qui est appelé une réponse super Clausius-Clapeyron.

370 Les changements observés d'intensité et de fréquence calculés selon Ribes et al (2019)
 371 ont été mis à jour par Météo-France (B. Dubuisson DCSC/EMA) pour tenir compte des
 372 dernières années et avec un nombre de stations prises en compte qui a légèrement évolué
 373 suite à des fermetures ou à l'ajout de séries homogénéisées (80 stations) : sur la période
 374 1961-2022, les tendances sont légèrement revues à la baisse en raison d'années récentes

375 relativement peu actives, avec une intensification de +12% [-1 ; +28] et une augmentation
376 de la fréquence des événements supérieurs à 200 mm/j multipliée par un facteur 2,0 [1.0 ;
377 3.9].

378 Il n'y a pas de lien direct entre l'augmentation des épisodes de pluies intenses et l'évo-
379 lution des crues. En effet, la réponse hydrologique au forçage pluvieux n'est pas linéaire
380 et les crues dépendent également d'autres facteurs comme l'humidité des sols, la structure
381 des pluies intenses (étendue, intensité, durée) ou l'occupation des sols. Par ailleurs, des
382 aménagements hydrauliques peuvent également permettre de limiter les phénomènes de
383 crue malgré une augmentation des fortes précipitations. Néanmoins, il existe des limites
384 physiques et financières à ces stratégies d'adaptation si bien qu'il reste très important de
385 préciser la nature et l'ampleur de l'amplification du cycle hydrologique à l'échelle régionale.
386 Sur le sud-est de la France, on observe une tendance globale de diminution du nombre de
387 crues annuelles, mais un léger signal à la hausse de l'intensité des crues les plus fortes
388 (Tramblay et al, 2019). La thèse ne s'intéressant pas aux conséquences hydrologiques des
389 épisodes méditerranéens, la thématique des crues ne sera plus abordée par la suite.

390 **1.2 Représentation des épisodes méditerranéens dans** 391 **les modèles de climat**

392 Pour modéliser et prévoir les épisodes méditerranéens pour des échéances proches,
393 des modèles de PNT sont à la disposition des prévisionnistes (cf. Section 1.1.2.6). Pour
394 connaître leur évolution future dans un contexte de réchauffement climatique, des modèles
395 de climat sont utilisés sur de longues périodes, forcés par des concentrations de gaz à effet
396 de serre (GES) et d'aérosols qui évoluent au fil des ans suivant différents scénarios socio-
397 économiques. Il s'agit donc maintenant de s'intéresser non plus aux échelles de temps de la
398 météorologie, qui coïncident avec les échelles de temps des processus physiques en jeu, mais
399 à celles du climat, c'est-à-dire sur des périodes de temps longues, allant de la saison au
400 millénaire. En effet, l'étude du climat correspond à l'étude de l'ensemble des phénomènes
401 caractérisant l'état moyen de l'atmosphère, sa variabilité et son évolution en un lieu donné
402 sur des périodes de temps longues.

403 **1.2.1 Par les modèles globaux de climat**

404 De manière classique, pour représenter, comprendre et appréhender les climats passés
405 et futurs, on utilise des modèles de circulation générale (GCMs - General Circulation Mo-
406 dels), appelés couramment modèles globaux de climat. Généralement couplés et avec des
407 degrés de complexité plus ou moins importants, ces modèles tournent sur le globe pour
408 de longues périodes temporelles (plusieurs centaines d'années) et pour bien prendre en
409 compte leur variabilité interne, sous forme d'ensemble avec plusieurs membres. Pour que
410 cela soit compatible avec les coûts de calcul, la résolution horizontale de ces modèles est de
411 l'ordre de la centaine de kilomètres (de 50 à 300 km pour les GCMs de l'exercice CMIP6
412 (Coupled Model Intercomparison Project) réalisé dans la perspective du sixième rapport

413 du GIEC). Or cette résolution grossière ne leur permet pas de représenter correctement la
 414 topographie complexe du nord-ouest de la Méditerranée, ce qui est illustré par la Figure
 415 1.17 qui compare la topographie sur la France entre des modèles de différentes résolutions.

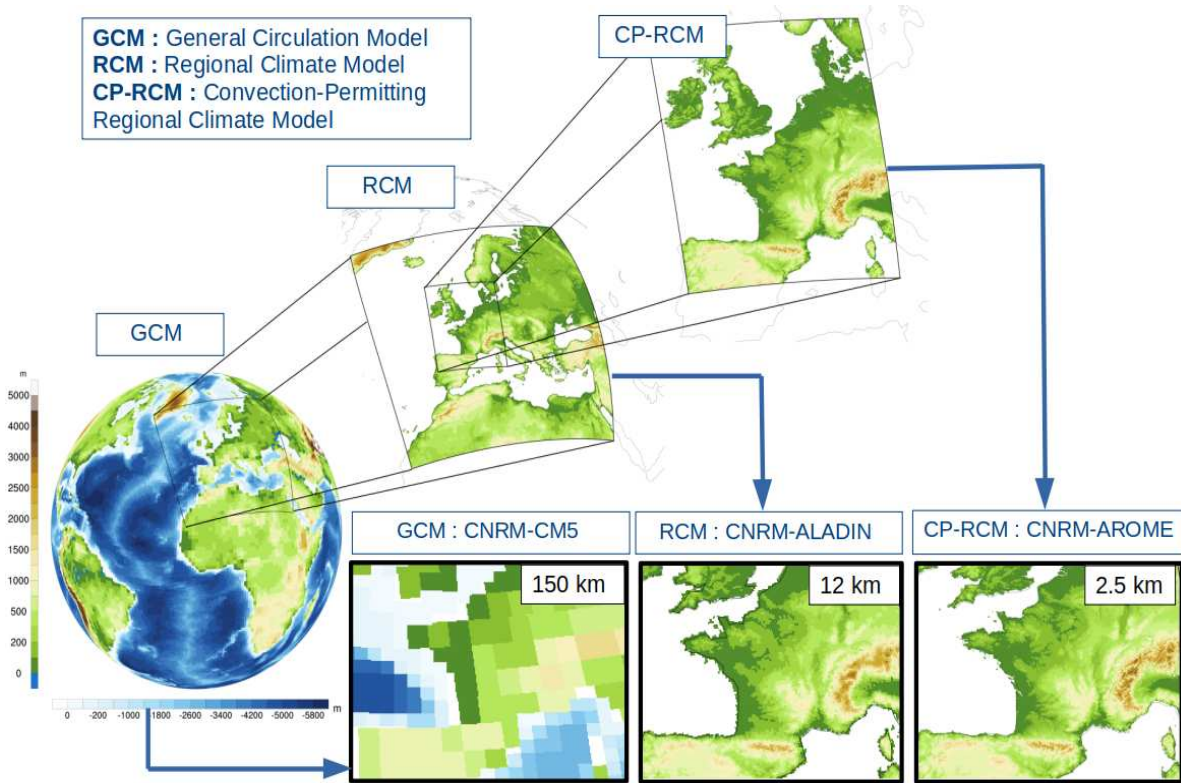


FIGURE 1.17 – Les différents modèles de climat et la topographie de la France vue par des modèles de différentes résolutions

416 De même, les processus de méso-échelle impliqués dans les épisodes méditerranéens
 417 (Ruti et al, 2016) et indispensables à leur simulation sont mal représentés par ces modèles.
 418 En particulier, tous les phénomènes sous-maille qui ne peuvent être traités par la dynamique
 419 sont représentés par des paramétrisations physiques, c'est-à-dire par des descriptions plus
 420 ou moins simplifiées et approximatives de l'influence moyenne de ces processus sur les
 421 variables de grande échelle au sein d'une maille du modèle : avec une maille de l'ordre de
 422 la centaine de kilomètres, tous les phénomènes convectifs y compris la convection profonde
 423 sont donc paramétrisés. Les effets combinés d'une maille grossière et des simplifications
 424 imposées par les paramétrisations entraînent une large sous-estimation des précipitations
 425 extrêmes par les GCMs (Torma et al, 2015; Ruti et al, 2016). Cette limitation est illustrée
 426 par la Figure 1.18 qui compare les observations et les cumuls de précipitation pour un
 427 épisode méditerranéen donné, simulés par des modèles de différentes résolutions, et par la
 428 Figure 1.19 qui montre la mauvaise représentation, en termes d'intensité et de localisation,
 429 des précipitations extrêmes quotidiennes de l'automne sur 20 ans par le GCM avec une
 430 résolution de 150 km.

431 Ainsi, de par ces différentes limitations, les GCMs ne constituent pas un outil de mo-
 432 délisation satisfaisant pour représenter correctement les épisodes méditerranéens et leurs
 433 caractéristiques.

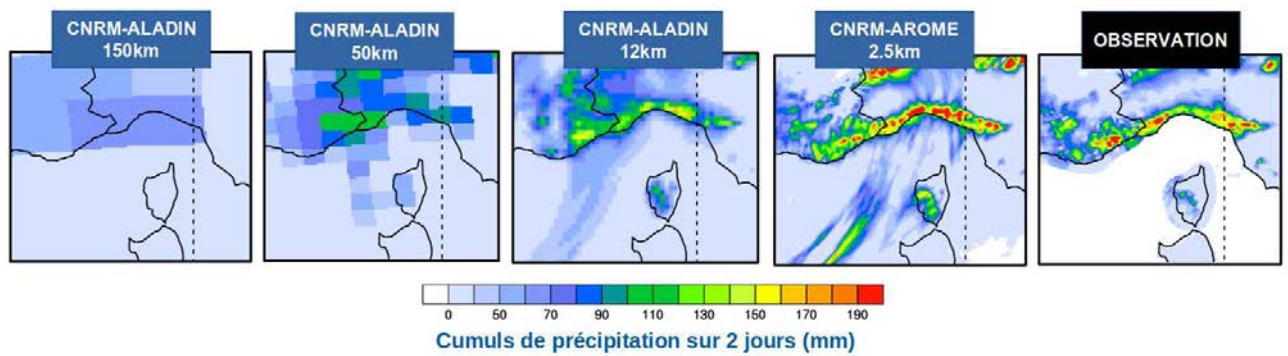


FIGURE 1.18 – Le cas de l’épisode méditerranéen des 30 et 31 octobre 2010 vu par des modèles de climat de résolutions différentes avec comparaison aux observations (COMEPHORE sur la France et GRIPHO sur l’Italie)

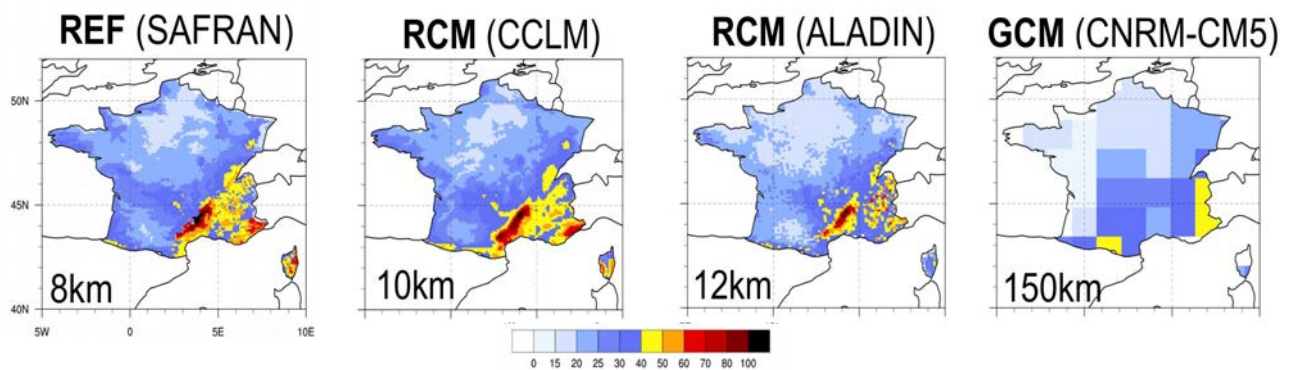


FIGURE 1.19 – Comparaison des percentiles 99% des précipitations quotidiennes (en mm/j) pour l’automne (SON) pour la période 1989-2008 entre les observations (SAFRAN, 8 km), les RCMs COSMO-CLM et CNRM-ALADIN à 12 km, et le GCM CNRM-CM5 à 150 km (Ruti et al, 2016)

434 1.2.2 Par une descente d’échelle statistique à partir des modèles 435 globaux de climat

436 Des méthodes de descente d’échelle statistique sont parfois utilisées pour étudier les
437 pluies extrêmes à partir des simulations des GCMs. Appliquées aux précipitations quoti-
438 diennes (Maraun et al, 2010), ces méthodes reposent sur l’établissement d’un lien statis-
439 tique entre des variables de grande échelle simulées par les GCMs et les données observées
440 des paramètres que l’on cherche à représenter localement avec, comme prédicteurs, les va-
441 riables de grande échelle et comme prédicands, les variables locales. Les liens sont établis
442 en climat présent, puis appliqués pour les projections.

443 Toutefois, l’ensemble de ces méthodes repose sur l’hypothèse que la relation statistique
444 établie en climat présent reste valable pour un climat futur, ce qui n’est pas assuré. Elles
445 nécessitent également des jeux de données d’observations fiables, de résolution adaptée à
446 la descente d’échelle visée et disponibles sur de longues périodes.

447 Une approche hybride mêlant descentes d’échelle statistique et dynamique peut égale-
448 ment être mise en place et a été utilisée lors du projet CYPRIM (CYclogénèses et Précipita-

449 tions Intenses en Méditerranée, 2005-2008, Boudevillain et al (2009); Ricard et al (2009))
450 pour estimer l'évolution future des épisodes méditerranéens français : dans Beaulant et al
451 (2011), des situations synoptiques favorables sont sélectionnées dans la réanalyse ERA-40
452 et dans des simulations futures du GCM ARPEGE-Climat, puis rejouées par un modèle
453 à aire limitée et à haute résolution (ici Méso-NH, 2.5 km). Toutefois, ces méthodes sont
454 basées sur un nombre limité de cas et ne peuvent donc pas apporter de réponse robuste
455 aux questions sur l'évolution future des précipitations extrêmes.

456 Ainsi, ces différentes limitations réduisent notre confiance en l'utilisation de ces mé-
457 thodes de descente d'échelle statistique pour obtenir des résultats robustes sur l'évolution
458 future des épisodes méditerranéens.

459 **1.2.3 Par une descente d'échelle dynamique avec des modèles** 460 **régionaux de climat**

461 **1.2.3.1 Les modèles régionaux de climat à convection profonde paramétrisée**

462 La solution la plus largement utilisée par la communauté de modélisation du climat
463 pour mieux représenter les climats régionaux est la descente d'échelle dynamique. En effet,
464 depuis la fin des années 1980, afin d'augmenter la résolution dans des régions spécifiques,
465 des modèles climatiques à aire limitée, appelés modèles climatiques régionaux (RCMs -
466 Regional Climate Models) (Giorgi and Bates, 1989; Giorgi, 2019) ont été développés. Avec
467 des résolutions voisines de 50 km à leur création, puis de 12 km de nos jours, ces modèles
468 sont forcés au bord de leur domaine par des GCMs qui leur apportent les conditions aux
469 limites latérales (LBC : Lateral Boundary Conditions). Le Chapitre 10 du sixième rap-
470 port du GIEC (Doblas-Reyes et al, 2021) indique avec une confiance élevée que "les RCMs
471 apportent une valeur ajoutée par rapport aux simulations globales en représentant de nom-
472 breux phénomènes météorologiques et climatiques régionaux, en particulier dans les régions
473 à l'orographie complexe ou aux caractéristiques de surface hétérogènes, ainsi que pour les
474 phénomènes à l'échelle locale" (AR6, WG1, 10.3.3.10). La notion de valeur ajoutée sera
475 précisée dans la Section 1.2.5. Plusieurs études ont démontré la valeur ajoutée des RCMs
476 par rapport aux GCMs, en particulier pour les précipitations extrêmes (Déqué and Somot,
477 2008; Ruti et al, 2016; Prein et al, 2016; Fantini et al, 2018). Des études multi-modèles
478 basées sur des simulations des ensembles EURO-CORDEX, ENSEMBLES et/ou Med-
479 CORDEX ont également montré une valeur ajoutée plus grande lorsque l'on passe de 50 km
480 à 12 km (Colin, 2011; Jacob et al, 2014; Prein et al, 2016; Fantini et al, 2018). En outre, les
481 RCMs peuvent modifier localement le signal de changement climatique attendu par rapport
482 aux GCMs, par exemple, en Amérique du Nord (Di Luca et al, 2012), dans la région alpine
483 (Torma et al, 2015; Giorgi et al, 2016) et sur l'ensemble de l'Europe (Rajczak and Schär,
484 2017; Coppola et al, 2021a).

485 Toutefois, même à 12 km, ces modèles utilisent des paramétrisations physiques simi-
486 laires à celles utilisées par les GCMs, en particulier un schéma de convection profonde.
487 Cette paramétrisation présente des limites pour représenter correctement la distribution
488 des précipitations : le cycle diurne des précipitations est décalé (Hohenegger et al, 2008),

489 la fréquence des précipitations faibles est surestimée, tandis que les extrêmes restent sous-
490 estimés (Déqué and Somot, 2008; Fumière et al, 2020). De plus, la résolution est encore
491 trop grossière pour représenter les processus de petite ou de méso-échelle impliqués dans
492 le déclenchement des précipitations infra-journalières (Berg et al, 2019) et des phénomènes
493 convectifs. Ces limitations affectent donc leur représentation des épisodes méditerranéens.

494 1.2.3.2 Les modèles régionaux de climat à convection profonde explicite

495 Depuis la fin des années 1990, des modèles à aire limitée permettant la convection
496 profonde (Convection-Permitting Models : CPMs) ont été développés en mode recherche,
497 puis pour la prévision numérique du temps afin de prévoir les événements extrêmes tels
498 que les épisodes méditerranéens. Ce fut le cas à Météo-France avec le développement du
499 modèle AROME comme cela a été rappelé en Section 1.1.2.6. Combinant une résolution
500 spatiale de 1 à 3 km et l’assimilation de données observées à haute résolution, les CPMs
501 permettent une description réaliste de la convection et des mécanismes de déclenchement
502 associés. Les principaux avantages de ces modèles sont les suivants :

- 503 • topographie à haute résolution ;
- 504 • description détaillée des surfaces ;
- 505 • paramétrisations physiques sophistiquées, comme pour la microphysique, la turbu-
506 lence ou la convection peu profonde ;
- 507 • convection profonde explicitement simulée : en effet, grâce à l’augmentation de la
508 résolution, les mouvements verticaux locaux peuvent être directement modélisés par
509 la dynamique du modèle : l’approximation hydrostatique peut être levée, la convection
510 profonde est explicitement simulée par la dynamique non hydrostatique du modèle
511 et non plus par des paramétrisations. Les équations pronostiques des hydrométéores
512 permettent le transport des nuages et des précipitations d’un pas de temps à l’autre
513 avec un effet-mémoire, ce qui permet l’advection, le développement et la décroissance
514 de la convection organisée, et donc une meilleure représentation des orages et par
515 conséquence, des épisodes méditerranéens ;
- 516 • données non seulement au pas de temps quotidien, mais également à l’échelle horaire,
517 voire infra-horaire.

518 En climat, ces modèles ont d’abord été utilisés pour des études de cas en mêlant des
519 méthodes statistiques et dynamiques, à partir de GCMs comme nous l’avons vu avec
520 Beaulant et al (2011), mais aussi à partir de RCMs (Meredith et al, 2018).

521 Il a fallu attendre les années 2010 et l’augmentation de la puissance de calcul pour pou-
522 voir utiliser les CPMs en mode climat avec des simulations continues de quelques années à
523 quelques dizaines d’années. Le terme désignant cette nouvelle génération de modèles n’est
524 pas complètement défini au sein de la communauté : si le terme Convection-Permitting
525 Regional Climate Models (CP-RCMs) est largement employé, certains parlent seulement
526 de Convection-Permitting Models (CPMs), auquel il pourrait manquer les spécificités ré-
527 gionales et climatiques, ou encore de Cloud-Resolving Models (CRMs), qui sous-entend, à
528 tort, que les nuages sont résolus, ce qui n’est pas le cas à ces résolutions. La terminologie

529 "à échelle kilométrique" (ou km-scale) peut être aussi employée pour qualifier ces modèles.
 530 Même le terme Convection-Permitting peut être trompeur, puisque seule la convection
 531 profonde est résolue explicitement par le modèle, alors que la convection peu profonde,
 532 processus qui reste sous-maille, doit encore être paramétrisée. Le terme CP-RCM, qui
 533 semble un meilleur compromis en indiquant que ces modèles qui sont une variante des
 534 RCMs sans schéma de convection profonde et en constituent donc une sous-famille, sera
 535 utilisé dans la suite du manuscrit.

536 En Europe, plusieurs familles de CP-RCMs ont été développées ces dernières années. La
 537 plupart d'entre elles se basent sur des modèles CPMs développés à l'origine pour la PNT
 538 et bénéficient de leur expérience (les familles AROME, COSMO-CLM ou CCLM, UM
 539 et WRF). Deux autres familles sont des modèles non hydrostatiques à haute résolution
 540 récemment développés à partir de RCMs existants (familles RegCM et REMO).

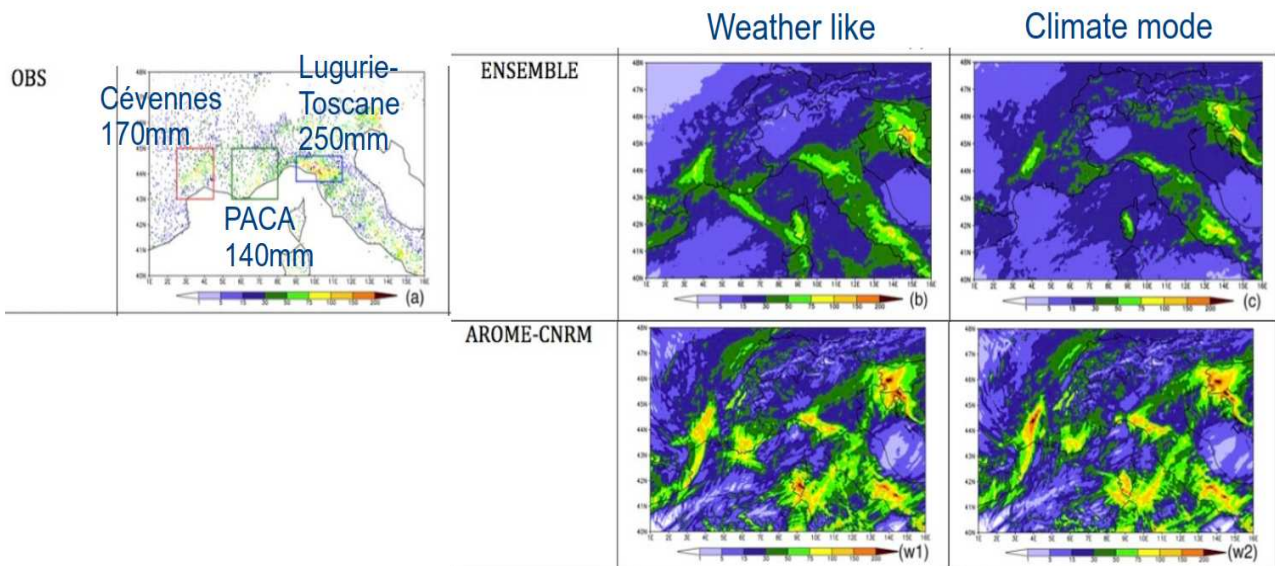


FIGURE 1.20 – Cumuls de précipitation en mm pour le cas HyMeX-IOP16 pour les observations, la moyenne de l'ensemble multi-modèle et le membre AROME-CNRM pour le mode Weather like et le mode Climate mode (Coppola et al, 2020)

541 Le Chapitre 10 du sixième rapport du GIEC (Doblas-Reyes et al, 2021) indique avec une
 542 confiance élevée que "les simulations à une résolution permettant la convection apportent
 543 de la valeur ajoutée à la représentation de la convection profonde et des phénomènes asso-
 544 ciés" (AR6 WG1 10.3.3.2). Quelques premières études d'évaluation utilisant cette nouvelle
 545 génération de modèles de climat ont déjà été réalisées. Si on se limite aux résultats sur les
 546 précipitations et à l'Europe, plusieurs études ont montré une représentation réaliste des
 547 caractéristiques des précipitations par les CP-RCMs, en particulier à l'échelle horaire :
 548 pour la région alpine (Prein et al, 2013; Ban et al, 2014; Lind et al, 2016; Reder et al,
 549 2020), l'Europe centrale (Knist et al, 2020), le Royaume-Uni (Kendon et al, 2014), le sud
 550 de l'Allemagne (Fosser et al, 2015), la Belgique (Brisson et al, 2016), la Fenno-Scandinavie
 551 (Lind et al, 2020) et le sud-est de la France (Fumière et al, 2020). Leutwyler et al (2017) et
 552 Berthou et al (2020) confirment ces résultats sur un large domaine pan-européen avec, en

553 particulier, une amélioration du cycle diurne des précipitations et de la distribution horaire
 554 des précipitations en été et en automne par rapport aux RCMs. Le premier article de revue
 555 sur cette nouvelle génération de modèles de Prein et al (2015), et plus récemment la revue
 556 de Lucas-Picher et al (2021) listent les principales avancées démontrées et attendues avec
 557 ces modèles.

558 Si l'on s'intéresse plus spécifiquement aux événements méditerranéens, les études sont
 559 moins nombreuses. Dans la première intercomparaison européenne de CP-RCMs en multi-
 560 modèle (Coppola et al, 2020), l'un des trois cas d'étude est consacré à un épisode mé-
 561 diterranéen de référence, HyMeX-IOP16, qui a eu lieu en automne 2012, lors d'une des
 562 campagnes de mesure du programme HyMeX. Deux séries d'une vingtaine de simulations
 563 sont réalisées, l'une appelée "Weather like" où le début des simulations est choisi au début
 564 de l'épisode et l'autre en "Climate mode" où les simulations démarrent le mois précédent.
 565 La Figure 1.20 indique un bon comportement de la moyenne de l'ensemble multi-modèle
 566 pour reproduire cet événement, y compris dans le mode "Climate mode" et en particulier
 567 pour le modèle CNRM-AROME.

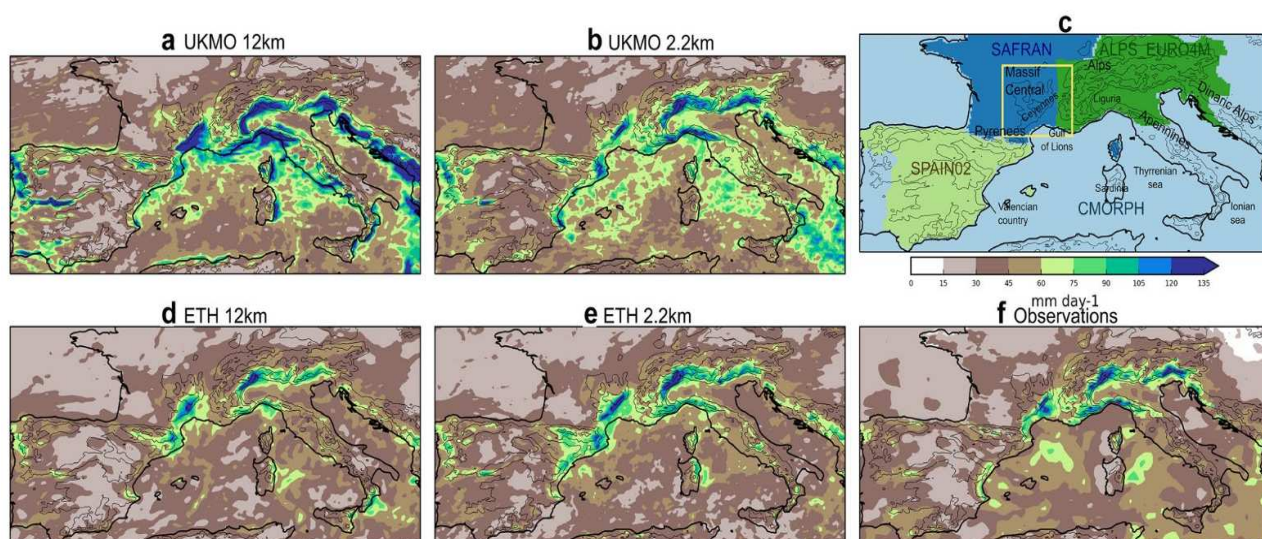


FIGURE 1.21 – Moyenne des valeurs supérieures au percentile 99% des précipitations quotidiennes de l'automne (SON) en mm/j pour (a) UM-UKMO 12 km, (b) UM-UKMO 2.2 km, (d) CCLM-ETHZ 12 km, (e) CCLM-ETHZ 2.2 km et (f) observations disponibles : composite de CMORPH et produits régionaux grillés, comme indiqué dans le panneau (c) (Berthou et al, 2020)

568 Dans Berthou et al (2020), la valeur-ajoutée de deux CP-RCMs, UM-UKMO et CCLM-
 569 ETHZ à 2.2 km, sur un domaine pan-européen pour des simulations d'évaluation de dix
 570 ans, est démontrée, en particulier pour la représentation des précipitations extrêmes quoti-
 571 diennes de l'automne (cf. Figure 1.21) et également à travers une étude de cas pour
 572 l'événement sur le Gard de septembre 2002.

573 Sur un domaine couvrant le sud-est de la France et une période de 10 ans, Fumière et al
 574 (2020) démontrent la valeur ajoutée du CP-RCM CNRM-AROME (2.5 km) par rapport
 575 au RCM CNRM-ALADIN (12.5 km) pour les précipitations extrêmes quotidiennes et plus

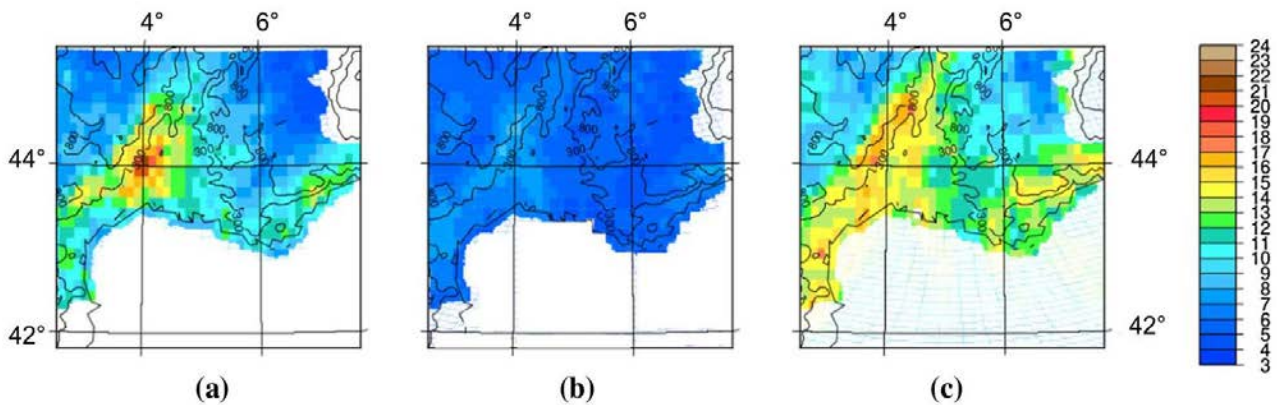


FIGURE 1.22 – Distribution spatiale du percentile 99.9% des précipitations horaires (mm/h) pour les observations de COMEPHORE (1 km) (a), pour le RCM CNRM-ALADIN (12.5 km) (b) et pour le CP-RCM CNRM-AROME (2.5 km) (c), interpolés sur une grille commune à 12.5 km, pour l’automne élargi (SOND) entre 1997 et 2006 (Fumière et al, 2020)

576 particulièrement pour les extrêmes horaires de l’automne (cf. Figure 1.22) en utilisant pour
 577 la première fois le jeu de données observées à haute résolution spatiale et temporelle qui fait
 578 référence sur la France, COMEPHORE (1 km). En s’intéressant aux queues de distribution
 579 des précipitations sur une boîte Cévennes (cf. Figure 1.23), CNRM-ALADIN ne parvient
 580 pas à simuler les pluies intenses correctement, dès 12 mm/h et dès 60 mm/j, alors que
 581 CNRM-AROME reste proche des observations jusqu’à 30 mm/h et 200 mm/j. Fumière
 582 (2019) indique également que cette valeur ajoutée du CP-RCM pour les pluies extrêmes
 583 est robuste à des changements de configuration de CNRM-AROME, que ce soit la version,
 584 le domaine ou le modèle forceur.

585 Ainsi, ces premières études semblent démontrer que les CP-RCMs constituent des outils
 586 de modélisation adaptés pour l’étude des épisodes méditerranéens, même si pour l’instant,
 587 leur valeur ajoutée a été établie sur des périodes relativement courtes et pour des sta-
 588 tistiques eulériennes qui ne prennent pas en compte les caractéristiques intrinsèques des
 589 systèmes convectifs.

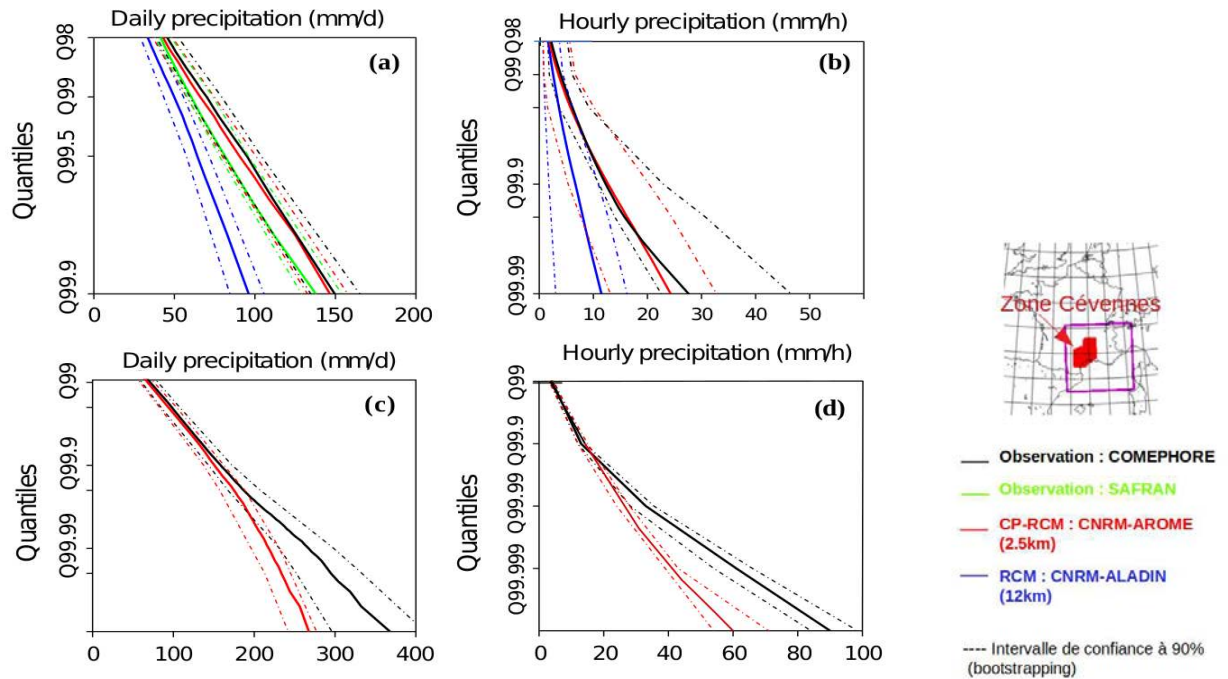


FIGURE 1.23 – Queues de fonction de distribution cumulative (SOND, 1997-2006) sur la boîte Cévennes pour les précipitations quotidiennes (a) et (c) et les précipitations horaires (b) et (d), interpolées sur la grille à 12.5 km sur la première ligne et 2.5 km sur la deuxième ligne, pour CNRM-AROME, CNRM-ALADIN et les observations COMEPHORE et SAFRAN (Fumière et al, 2020)

590 1.2.4 Les sources d’incertitudes des projections climatiques

591 Pour comprendre et analyser correctement les projections issues de modèles de climat,
 592 il convient de s’intéresser aux différentes sources d’incertitude présentes. Classiquement,
 593 les sources d’incertitude se répartissent en trois catégories :

- 594 • les incertitudes liées au scénario socio-économique, c’est-à-dire les hypothèses d’évolu-
 595 tions démographiques et économiques qui se traduisent par des scénarios d’émission
 596 de gaz à effet de serre et d’aérosols. On peut également les nommer incertitudes
 597 réflexives ;
- 598 • les incertitudes liées au modèle de climat, c’est-à-dire aux approximations numé-
 599 riques dans la résolution de la dynamique et aux hypothèses dans les paramétrisa-
 600 tions physiques, liées à une connaissance imparfaite et à une modélisation imparfaite
 601 de certains phénomènes. On peut également les nommer incertitudes épistémiques ;
- 602 • les incertitudes liées à la variabilité naturelle du climat, d’origine chaotique, qui est en
 603 particulier la source des variations importantes du climat d’une année à l’autre et qui
 604 peut refléter en partie le caractère aléatoire de certaines fluctuations climatiques. Ces
 605 incertitudes peuvent être atténuées en réalisant de larges ensembles de projections.
 606 On peut également les nommer incertitudes stochastiques.

607 Hawkins and Sutton (2011) (remis à jour récemment avec le grand ensemble SMILEs et
 608 les modèles de CMIP5 et 6 par Lehner et al (2020)) décomposent ces trois contributions par

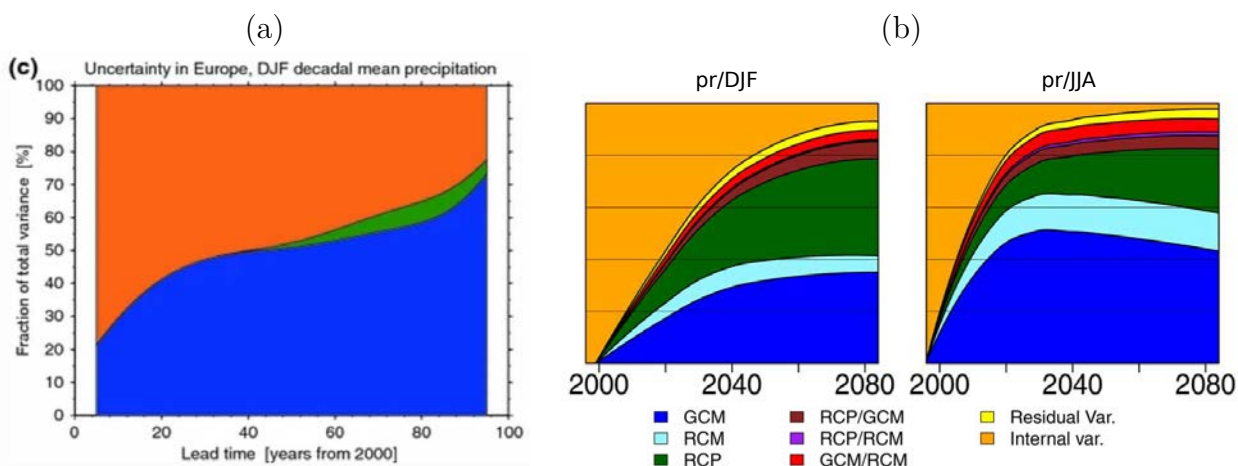


FIGURE 1.24 – (a) Contribution aux incertitudes pour les changements de précipitations moyennes décennales de la variabilité interne (orange), l’incertitude du modèle (bleu) et l’incertitude du scénario (vert) pour l’hiver (DJF) et l’Europe (Hawkins and Sutton, 2011) ; (b) Les différentes contributions aux incertitudes pour les changements relatifs de précipitations totales (pr) en hiver (DJF) et en été (JJA) en fonction du temps par rapport à la période 1981-2010 pour la zone Méditerranée (Evin et al, 2021)

609 une méthode statistique ANOVA pour un ensemble multi-modèle de l’exercice CMIP3. Pour
 610 les précipitations hivernales et l’Europe, si la variabilité interne joue un rôle prédominant
 611 dans les sources d’incertitudes les premières décennies, c’est le choix du modèle qui devient
 612 rapidement la principale source d’incertitude, tandis que le choix du scénario économique
 613 importe relativement peu (cf. Figure 1.24 a).

614 Evin et al (2021) ont appliqué cette approche statistique à un large ensemble multi-
 615 modèle de simulations EURO-CORDEX à haute résolution (0.11°) en ajoutant les contri-
 616 butions du RCM et du GCM (cf. Figure 1.24 b). Pour les précipitations et la zone Méditer-
 617 ranée, ils montrent un rôle majeur du choix de scénario en hiver, ainsi qu’une contribution
 618 du GCM qui l’emporte sur celle du RCM. L’été, le choix du modèle devient la princi-
 619 pale source d’incertitude et la contribution du RCM devient plus importante qu’en saison
 620 hivernale.

621 On pourra se demander si l’utilisation des CP-RCMs en descente d’échelle dynamique
 622 des RCMs va ajouter un étage dans la pyramide des incertitudes ou bien diminuer la part
 623 des incertitudes modèles grâce à l’amélioration de la représentation de certains processus
 624 physiques, pouvant potentiellement mener à une convergence des réponses de cette nouvelle
 625 génération de modèles.

626 1.2.5 Performance des modèles et notion de valeur ajoutée

627 Evaluer la performance des modèles de climat constitue un pré-requis à leur utilisation
 628 comme outil de projection climatique. Pour cela, il est donc nécessaire de réaliser
 629 des simulations en climat récent qui peuvent être comparées à des jeux d'observation de
 630 référence.

631 Le fait de disposer de plusieurs outils de modélisation, de résolution et de complexité
 632 différentes, nous amène à aborder également la notion de valeur ajoutée. En effet, le pas-
 633 sage de l'échelle globale à l'échelle régionale ajoute des informations supplémentaires de
 634 fine échelle et donc une valeur ajoutée potentielle (Di Luca et al, 2012). S'il n'y a pas de
 635 définition communément utilisée de la valeur ajoutée, elle est présentée dans le Chapitre 10
 636 du sixième rapport du GIEC (Doblas-Reyes et al, 2021) dans la Section 10.3.3.2, comme
 637 "a characteristic that arises when one methodology gives further value to what another
 638 methodology yield", ce que l'on peut traduire par "une caractéristique qui apparaît lors-
 639 qu'une méthode ajoute de la valeur, c'est-à-dire améliore, ce qu'une autre méthode peut
 640 produire".

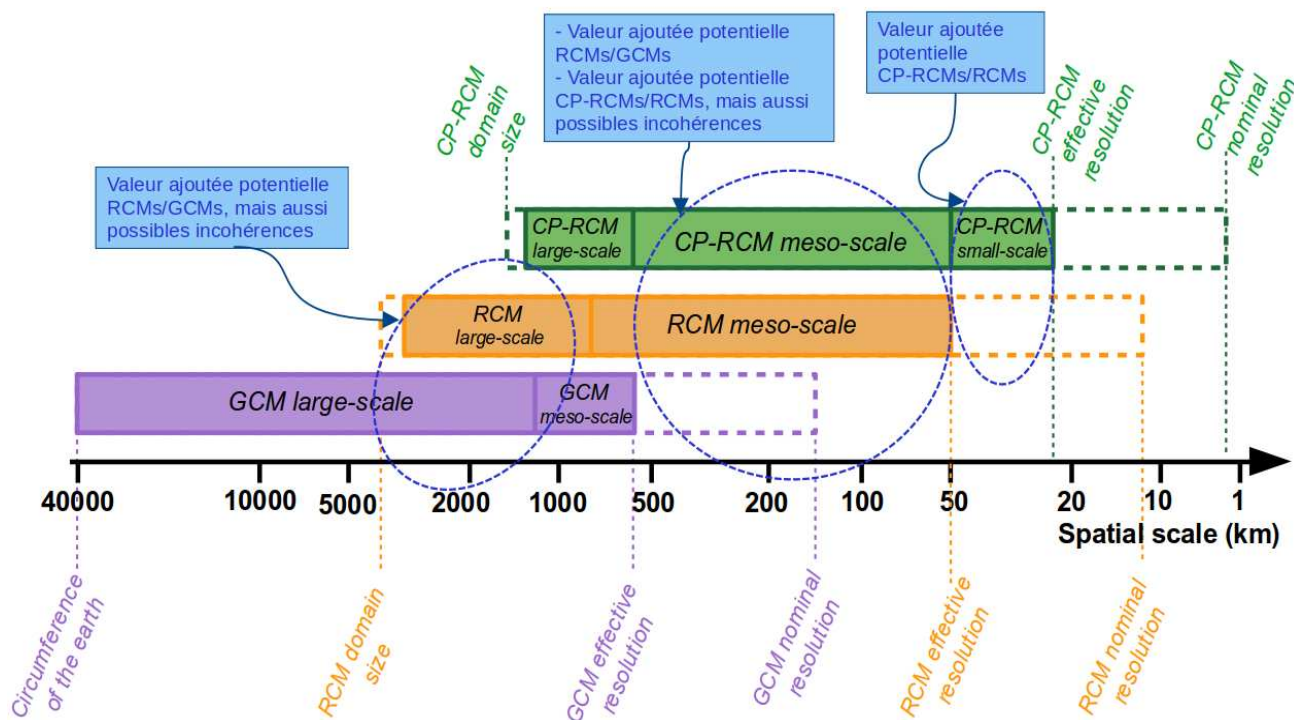


FIGURE 1.25 – Les valeurs ajoutées potentielles des RCMs par rapport aux GCMs et des CP-RCMs par rapport aux RCMs et leurs échelles spatiales - Figure adaptée du cours de modélisation régionale du climat de S. Somot - doi :10.5281/zenodo.4586910

641 Ainsi, les différentes méthodes de descente d'échelle ajoutent des informations, des dé-
 642 tails d'échelles spatiale ou temporelle plus petites : les RCMs ajoutent des informations
 643 de méso-échelle que la résolution des GCMs ne permet pas de simuler correctement ; les
 644 CP-RCMs, grâce à leur haute résolution et la résolution explicite de la convection pro-
 645 fonde, ajoutent encore des informations de plus petite échelle (cf. Figure 1.25). Mais outre

646 leur aspect plus réaliste à première vue, il faut vérifier que ces informations à plus haute
647 résolution, qu'on peut donc appeler valeur ajoutée potentielle, sont réellement pertinentes.
648 D'autre part, comme les domaines des RCMs sont relativement grands, l'information de
649 grande échelle venant du GCM peut également être modifiée par le RCM, ce qui constitue
650 une nouvelle valeur ajoutée potentielle et peut être source d'incohérences entre GCM et
651 RCM. Pour de petits domaines, le CP-RCM ne devrait pas trop modifier la grande échelle,
652 mais si les domaines s'agrandissent, l'information de grande échelle pourra également être
653 modifiée par le CP-RCM. De plus, ces modèles modifient l'information de méso-échelle du
654 RCM apportant une nouvelle valeur ajoutée potentielle, mais également quelques incohé-
655 rences. De plus, les valeurs ajoutées peuvent dépendre de la région, de la saison et des
656 processus physiques en jeu.

657 Démontrer que la valeur ajoutée potentielle est une valeur ajoutée réelle revient donc à
658 évaluer la performance d'un modèle en climat présent quant à la simulation d'un phénomène
659 donné par comparaison à des observations de référence. Si l'on cherche à quantifier la
660 valeur ajoutée d'un modèle par rapport à un autre, il peut être nécessaire d'interpoler les
661 données sur une grille commune, la plus grossière selon Hong and Kanamitsu (2014), pour
662 permettre la comparaison la plus juste. En climat futur, les modifications apportées par le
663 modèle régional par rapport au modèle global à différentes échelles peuvent également être
664 qualifiées de valeur ajoutée potentielle (Di Luca et al, 2016).

665 **1.2.6 Bilan : comparaison des outils de modélisation climatique**
 666 **pour l'étude des épisodes méditerranéens**

667 Le tableau ci-après résume et compare les différents outils de modélisation climatique
 668 existants pour la simulation des épisodes méditerranéens. Les modèles globaux à très haute
 669 résolution et convection profonde résolue qui commencent à être développés, ainsi que les
 670 nouvelles méthodes de descente d'échelle statistique de type émulateur, ne sont pas abordés
 671 ici, mais le seront dans le chapitre de perspectives.

Outil de modélisation	Avantages	Limitations
Modèles globaux de climat (GCMs)	<ul style="list-style-type: none"> - Grand nombre de simulations et d'ensembles disponibles (ex : CMIP6) - Dynamique grande échelle bien représentée - Complexité (Earth System Models - ESMs) 	<ul style="list-style-type: none"> - Résolution trop grossière (de l'ordre de la centaine de km) - Topographie pas correctement représentée - Paramétrisations (dont convection profonde) ne permettant pas une bonne représentation des processus de méso-échelle → précipitations extrêmes fortement sous-estimées et mal positionnées <p><i>Torma et al (2015); Ruti et al (2016)</i></p>
Descente d'échelle statistique à partir de GCMs ou de RCMs	<ul style="list-style-type: none"> - Peu coûteux 	<ul style="list-style-type: none"> - Relation statistique établie en climat présent pas assurée en futur - Nécessité de jeux d'observation à haute résolution adaptés
Descente d'échelle dynamique avec des modèles régionaux de climat (RCMs) <i>Giorgi (2019)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Zoom sur une région d'intérêt → augmentation de résolution et meilleure représentation du climat régional - Valeur ajoutée par rapport aux GCMs (en particulier pour les précipitations extrêmes) <p><i>Déqué and Somot (2008)</i> <i>Ruti et al (2016); Prein et al (2016)</i> <i>Fantini et al (2018)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Résolution (12 à 50 km) encore trop grossière - Topographie pas correctement représentée à petite échelle - Paramétrisations (dont convection profonde) ne permettant pas une bonne représentation des processus de petite et méso-échelle → précipitations extrêmes encore sous-estimées <p><i>Déqué and Somot (2008)</i> <i>Fumière et al (2020); Berg et al (2019)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Dépend des conditions aux limites

Outil de modélisation	Avantages	Limitations
Descente d'échelle dynamique avec des RCMs à convection profonde résolue (CP-RCMs) <i>Prein et al (2020)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Haute résolution (2-3 km) - Bonne représentation de la topographie et des surfaces - Paramétrisations avancées - Non-hydrostatisme et convection profonde résolue → Meilleure représentation des processus de petite et méso-échelle et valeur ajoutée par rapport aux RCMs (en particulier pour les précipitations extrêmes) <i>Fumière et al (2020); Berthou et al (2020)</i> <ul style="list-style-type: none"> - Données au pas de temps infra-quotidien, voire infra-horaire 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût de calcul et de stockage → simulations courtes et peu nombreuses - Dépend des conditions aux limites - Phénomènes sous-maille encore paramétrisés <ul style="list-style-type: none"> - Peu de tuning (en raison du coût)
Descente d'échelle hybride statistico-dynamique <i>Beaulant et al (2011); Meredith et al (2018)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Haute résolution (2-3km) → avantages des CP-RCMs	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre limité de cas → réponses peu robustes

Tableau 1.1 – Comparaison des outils de modélisation climatique pour l'étude des épisodes méditerranéens

672 1.3 Evolution future des pluies extrêmes méditerranéennes

673

674 1.3.1 Evolution future du climat méditerranéen

675 La zone méditerranéenne apparaît comme l'un des principaux « hot spots » ou « points
676 chauds » régionaux du changement climatique (Giorgi, 2006).

677 Un premier rapport MAR1 intitulé « Changement climatique et environnemental dans
678 le bassin méditerranéen – Situation actuelle et risques pour le futur » a été publié en 2020
679 par le groupement d'experts MedECC (Mediterranean Experts on Climate and environ-
680 mental Change, <https://www.medecc.org>). Il peut être considéré comme une déclinaison
681 régionale du rapport du GIEC. Utilisant un ensemble de simulations de RCMs sur le do-

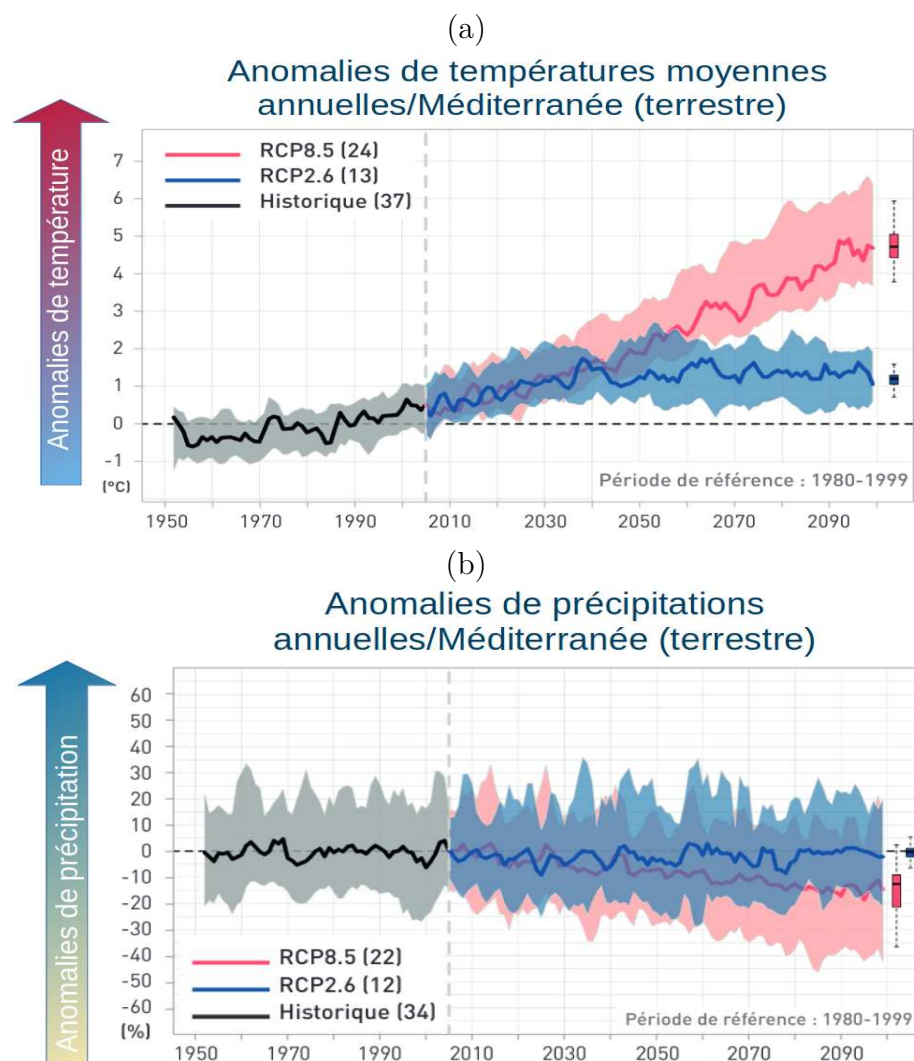


FIGURE 1.26 – Evolution des anomalies de températures moyennes annuelles (a) et de précipitations moyennes annuelles (b) au cours du 21e siècle par rapport à la période de référence du passé récent (1980-1999) sur la base de la moyenne d'un ensemble de simulations EURO-CORDEX de RCMs (12km) forcés par des GCMs de CMIP5 pour la zone Méditerranée terrestre pour les scénarios RCP2.6 et RCP8.5. Figures issues du rapport MAR1 (Cramer et al, 2020)

682 maine EURO-CORDEX, forcés par des GCMs de CMIP5, ce rapport indique, avec une
 683 confiance élevée, une poursuite de la hausse des températures au cours du 21e siècle, dans
 684 la fourchette de 0,9 à 1,5 °C ou 3,7 à 5,6 °C, selon que les émissions de gaz à effet de serre
 685 seront faibles (RCP2.6) ou élevées (RCP8.5). Cela correspond à une hausse plus rapide que
 686 la moyenne mondiale. Ces valeurs pourront être légèrement révisées à l'aune des résultats
 687 des modèles de climat de dernière génération (CMIP6) ou de contraintes observationnelles
 688 liées au réchauffement observé sur la période historique (Ribes et al, 2022). Concernant les
 689 précipitations, les projections climatiques futures indiquent un changement prédominant
 690 vers un régime de précipitation présentant une plus grande variabilité interannuelle, des
 691 intensités plus fortes et des extrêmes plus importants (en particulier en hiver, au printemps
 692 et en automne, mais pas dans les régions du sud) avec une confiance faible, des précipi-

693 tations moins fréquentes et des épisodes de sécheresse plus longs (en particulier en été et
 694 dans les pays du sud) avec une confiance moyenne. Concernant les précipitations extrêmes
 695 et donc les épisodes méditerranéens, ce rapport indique une augmentation des intensités,
 696 mais avec une confiance faible.

697 Le dernier rapport du GIEC (AR6) qui utilise également les simulations de la nouvelle
 698 génération de GCMs de CMIP6 indique toujours, avec une confiance élevée, une hausse
 699 des températures et un assèchement pour l'ensemble des quatre sous-régions de la zone
 700 Méditerranée (Ali et al (2022), cf. Figure 1.27). La confiance reste plus faible concernant
 701 l'augmentation des pluies extrêmes, excepté pour le niveau de réchauffement de 4°C. Le
 702 "Regional Fact Sheet" sur l'Europe de l'AR6 indique également, avec une confiance élevée,
 703 que "les précipitations extrêmes et les inondations devraient augmenter pour des niveaux
 704 de réchauffement supérieur à 1,5°C dans toutes les régions européennes, à l'exception de
 705 la Méditerranée".

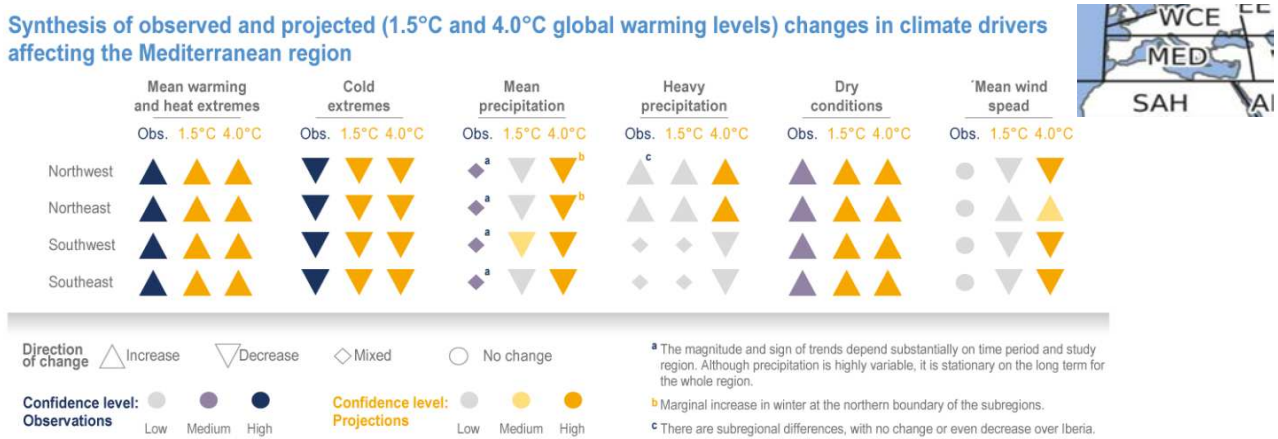


FIGURE 1.27 – Changements observés et projetés (à des niveaux de réchauffement global de 1,5°C et 4°C) des principaux indicateurs climatiques et les niveaux de confiance associés pour quatre sous-régions terrestres de la zone Méditerranée. Figure CCP4.3 issue de l'AR6 du GIEC WG2 (Ali et al, 2022)

706 Nous allons maintenant nous intéresser à quelques études qui mettent en évidence les
 707 incertitudes sur l'évolution des précipitations extrêmes méditerranéennes. Elles pourront
 708 nous permettre de mieux comprendre la confiance faible donnée dans les rapports MAR1
 709 et AR6.

710 1.3.2 Projections des pluies extrêmes méditerranéennes par les 711 GCMs

712 Pour les projections de précipitations extrêmes dans la région méditerranéenne, des
 713 divergences importantes sont présentes dans la réponse des modèles climatiques globaux
 714 (GCM, résolution d'environ 150 km). Ainsi, pour un ensemble multi-modèle de GCMs de
 715 CMIP6 suivant différents scénarios (cf. Figure 1.28), moins de 80% des modèles s'accordent
 716 sur le signe du changement des maxima de précipitation quotidienne (RX1day) sur les
 717 régions méditerranéennes et cela, quelque soit le degré de réchauffement global.

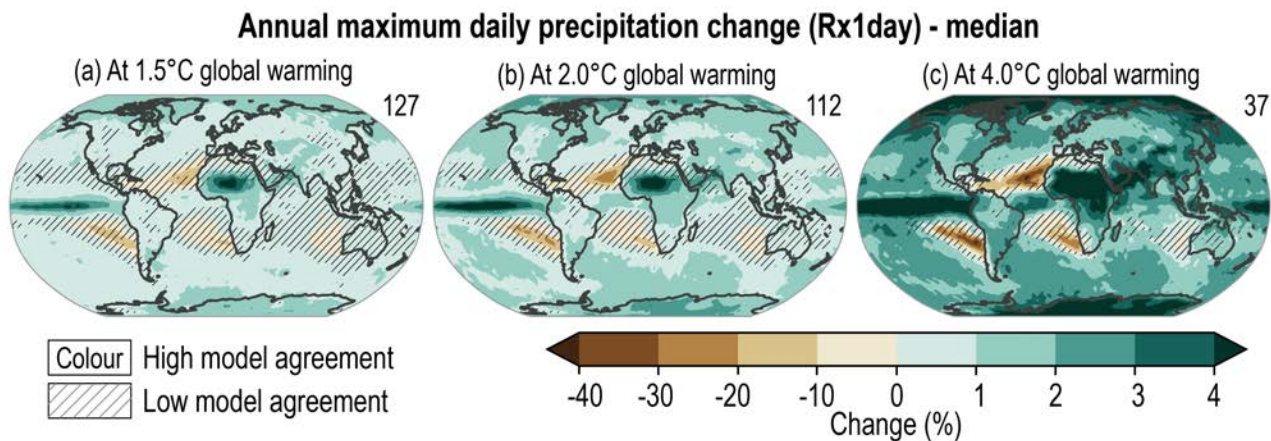


FIGURE 1.28 – Changements des précipitations quotidiennes maximales annuelles (RX1day) pour (a) 1,5°C, (b) 2°C, et (c) 4°C de réchauffement global par rapport à la référence de 1850-1900 pour un ensemble multi-modèle de GCMs de CMIP6 pour les scénarios SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, et SSP5-8.5. Les chiffres en haut à droite indiquent le nombre de simulations incluses. Régions hachurées où l'accord entre les modèles est faible, c'est-à-dire où <80% des modèles s'accordent sur le signe du changement. Figure 11.16 de l'AR6 WG1 Chapitre 11 du GIEC

718 Ces divergences dans la réponse des modèles étaient déjà mises en évidence dans des
719 études se basant sur des ensembles de GCMs de l'exercice précédent CMIP5. Dans une
720 étude reprise dans le dernier rapport du GIEC AR6 WG1 et se basant sur un ensemble
721 multi-modèle CMIP5, Pfahl et al (2017) trouvaient déjà un mauvais accord entre les mo-
722 dèles pour le signe du changement des RX1day dans la région méditerranéenne (cf. Fi-
723 gure 1.29). En décomposant ce changement total en changements dus aux contributions
724 thermo-dynamique et dynamique, ils montrent, avec un bon accord entre les modèles, que
725 la contribution thermodynamique est bien positive sur la zone méditerranéenne, dans le
726 sens de l'augmentation proposée par la relation de Clausius-Clapeyron. Mais à l'opposé, les
727 changements dus à la contribution dynamique, c'est-à-dire les changements de circulation
728 de grande échelle, conduisent à une diminution des précipitations extrêmes.

729 En étudiant l'évolution des valeurs de RX1day de durées de retour de 20 ans pour un
730 ensemble de 35 GCMs de l'exercice CMIP6, John et al (2022) cherchent à quantifier l'in-
731 certitude de la réponse des modèles et à mettre en évidence les régions où les changements
732 peuvent ne pas être cohérents avec l'augmentation suivant le taux de Clausius-Clapeyron
733 de 7%/°C. Si l'augmentation est cohérente avec le taux de Clausius-Clapeyron sur environ
734 83% du domaine terrestre mondial, ce n'est pas le cas sur les régions méditerranéennes où
735 l'augmentation est plus faible et peut être qualifiée de sous Clausius-Clapeyron.

736 De plus, ces modèles climatiques dont la convection profonde est paramétrisée et qui
737 présentent des résolutions grossières (cf. Table 1.1) ne peuvent pas représenter correcte-
738 ment les précipitations extrêmes méditerranéennes, ce qui limite la confiance accordée dans leurs
739 projections.

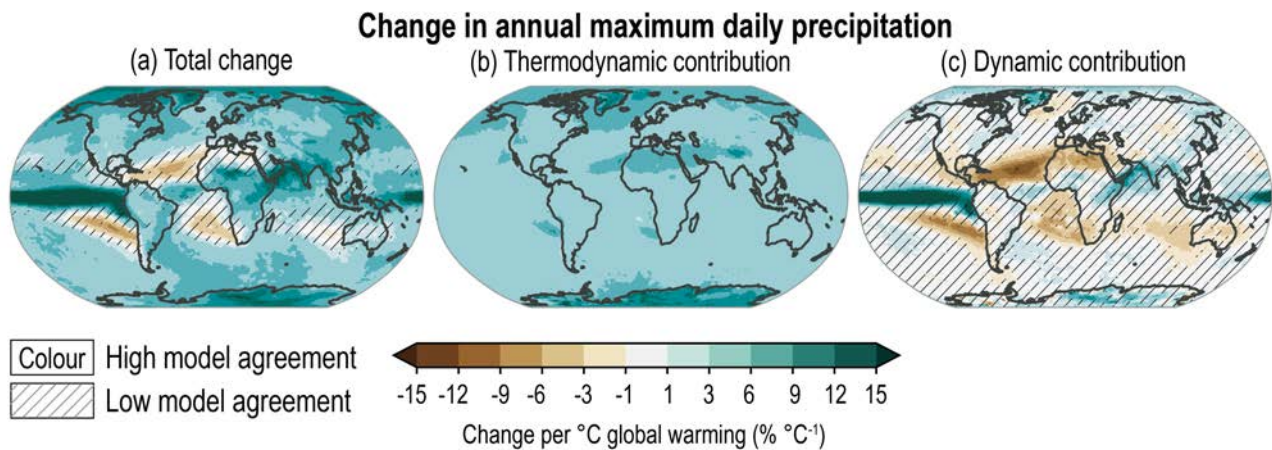


FIGURE 1.29 – Changements des précipitations quotidiennes maximales annuelles (RX1day) (en % par degré de réchauffement) pour la période 1950-2100 pour un ensemble multi-modèle de GCMs de CMIP5 (a) totaux (b) dus à la contribution thermodynamique (c) dus à la contribution dynamique. Régions hachurées où l'accord entre les modèles est faible, c'est-à-dire où <80% des modèles s'accordent sur le signe du changement. Box 11.1, Figure 1 de l'AR6 WG1 Chapitre 11 du GIEC, adaptée de Pfahl et al (2017)

1.3.3 Projections des pluies extrêmes méditerranéennes par les RCMs

Plusieurs études multi-modèles basées sur des ensembles de modèles climatiques régionaux (RCMs, résolution de 12 km) ont été réalisées dans le cadre d'EURO-CORDEX et couvrent la zone méditerranéenne. Elles indiquent également d'importantes incertitudes sur le signe du changement des précipitations extrêmes et leur amplitude sur ces régions. Dans le scénario de fortes émissions RCP8.5, Coppola et al (2021a), se basant sur un ensemble de 55 simulations forcées par des GCMs de CMIP5, montrent une large amplitude des changements de RX1day en moyenne spatiale sur la zone Méditerranée pour la fin du siècle, compris entre -7 à +17% suivant les modèles (cf. Figure 1.30 a). Zittis et al (2021), avec un ensemble de 33 simulations, n'a pas trouvé de tendance non paramétrique significative majoritaire pour l'évolution du RX1day sur le pourtour méditerranéen au cours du 21ème siècle selon le scénario RCP8.5 (cf. Figure 1.30 b).

Deux études utilisant une distribution statistique de valeurs extrêmes généralisées (GEV) non stationnaires pour représenter l'évolution des extrêmes de précipitation explorent les changements des valeurs de précipitations quotidiennes de durée de retour de 20 ans, pour la fin du siècle et toujours suivant le scénario RCP8.5. Sur la zone d'analyse Méditerranée définie dans le cadre du projet européen PRUDENCE et en se basant sur un ensemble de 15 simulations, Rajczak and Schär (2017) obtiennent une augmentation de +18% [+10; +25%]. En caractérisant la réponse des pluies extrêmes par bassin versant pour un ensemble de 11 simulations, Trambly and Somot (2018) montrent une diminution des précipitations extrêmes dans les régions au sud de la Méditerranée, et une augmentation dans la partie Nord. Toutefois, si l'on s'intéresse aux projections pour deux bassins versants du sud-est de la France, l'augmentation est faible avec des plages d'incertitude larges et une borne

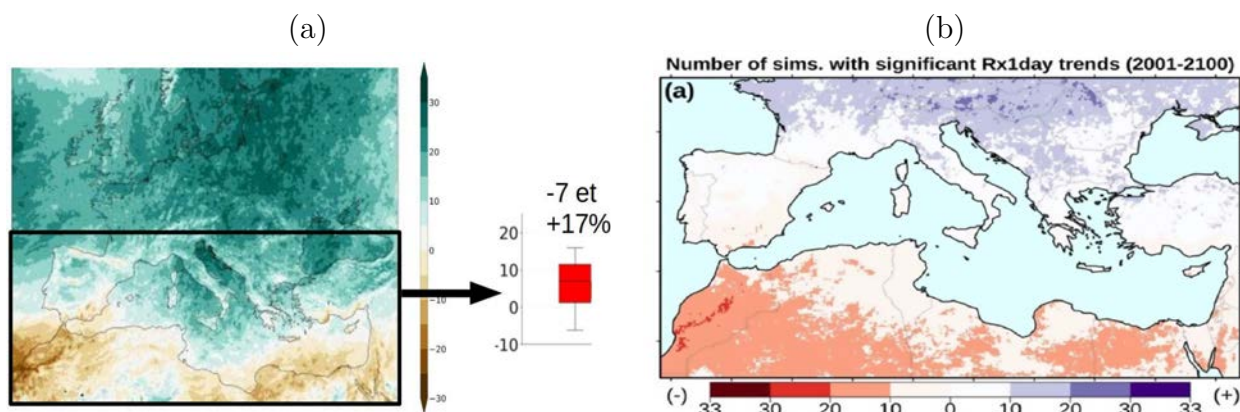


FIGURE 1.30 – (a) Changements des maxima annuels de précipitation quotidienne en pourcentage pour la période 2071–2100 par rapport à 1981–2010 pour un ensemble de 55 simulations de RCMs d’EURO-CORDEX selon le RCP8.5 (Coppola et al, 2021a) (b) Nombre de simulations de RCMs présentant des tendances non paramétriques significatives positives (en bleu) et négatives (en rouge) des maxima annuels de précipitation quotidienne pour le 21e siècle pour un ensemble de 33 simulations de RCMs d’EURO-CORDEX selon le RCP8.5 (Zittis et al, 2021)

764 inférieure négative : respectivement +2% [-13; +13%] et +6% [-14; +16%] pour les bas-
 765 sins versants relativement petits du Languedoc-Roussillon et de Provence-Var. Pour ces
 766 deux bassins, respectivement 6/11 et 8/11 simulations proposent une augmentation des
 767 précipitations extrêmes.

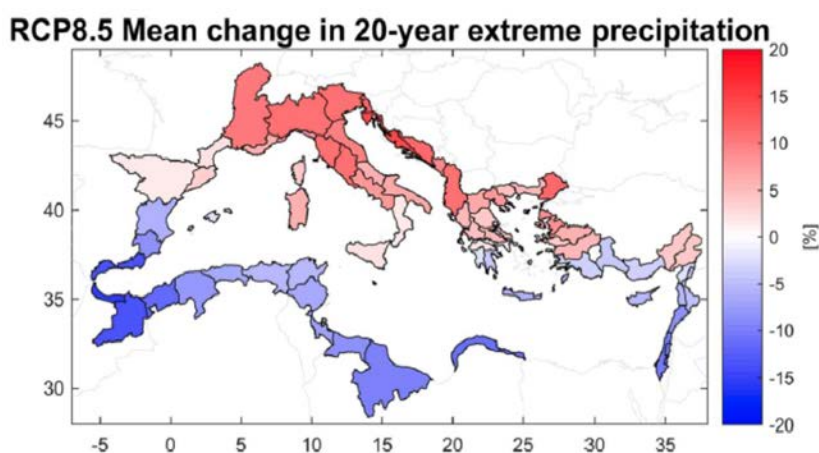


FIGURE 1.31 – Evolution des précipitations extrêmes quotidiennes de durée de retour de 20 ans en pourcentage par bassin versant sur le pourtour méditerranéen à partir d’un ensemble de 11 simulations de RCMs d’EURO-CORDEX suivant le scénario RCP8.5 (Tramblay and Somot, 2018)

768 La thèse de Jeanne Colin (Colin, 2011) qui s’intéresse à l’évolution future des précipi-
 769 tations extrêmes dans le sud-est de la France met également en évidence des divergences
 770 fortes suivant la méthode de descente d’échelle choisie. Ainsi, Colin (2011) fait la compa-
 771 raison de deux méthodes de descente d’échelle à partir d’une même simulation du modèle

772 ARPEGE-Climatv4 selon le scénario intermédiaire A1B. Elle montre une évolution opposée
773 des épisodes méditerranéens français en climat futur entre la descente d'échelle statistique
774 (méthode de désagrégation statistique appelée DSCLIM) et la descente d'échelle dynamique
775 avec le RCM CNRM-ALADIN à 12.5 km qui propose des événements plus fréquents, plus
776 intenses et plus étendus. Par exemple, une augmentation des intensités maximales des évé-
777 nements futurs de +5 à +10% est attendue avec la simulation de CNRM-ALADIN, alors
778 que DSCLIM propose une diminution de -5 à -10%.

779 De plus, la plupart des réponses proposées par ces études utilisant des RCMs sont
780 inférieures au taux de Clausius-Clapeyron attendu (sous Clausius-Clapeyron). A notre
781 connaissance, il n'existe pas d'étude similaire à Pfahl et al (2017) appliquée à des ensembles
782 de RCMs. Mais il serait possible également qu'une partie de ces incertitudes régionales
783 proviennent d'une diminution, probablement dépendante du GCM forceur utilisé, de la
784 fréquence des conditions météorologiques favorables, qui compenserait les augmentations
785 thermodynamiques des pluies extrêmes, liées à l'augmentation de l'humidité résultant du
786 réchauffement. Cela pourrait expliquer une partie des divergences dans les réponses des
787 modèles et donc des incertitudes sur l'intensification globale du cycle de l'eau dans les
788 régions méditerranéennes.

789 Ainsi, les études basées sur des RCMs font encore état de nombreuses incertitudes
790 dans la réponse des épisodes méditerranéens au changement climatique. Il faut également
791 rappeler que la résolution des RCMs et leur paramétrisation de la convection profonde ne
792 permettent pas encore une représentation correcte des épisodes méditerranéens (cf. Table
793 1.1), ce qui limite également la confiance que l'on peut porter aux projections de ces
794 événements extrêmes par ces modèles.

795 **1.3.4 Projections des pluies extrêmes méditerranéennes par les** 796 **CP-RCMs**

797 Quelques études utilisant les CP-RCMs s'intéressent aux projections climatiques des
798 précipitations extrêmes. Au début de cette thèse, elles étaient encore peu nombreuses et
799 se limitaient souvent à une seule simulation CP-RCM forcée par un GCM sur un domaine
800 géographique restreint et sur des périodes courtes. De nouvelles études ont été réalisées en
801 parallèle de cette thèse qui ne sont pas abordées ici, mais le seront pour certaines dans les
802 prochains chapitres.

803 Kendon et al (2017) ont montré la nécessité de représenter explicitement les systèmes
804 convectifs et donc d'utiliser des CP-RCMs pour étudier l'évolution des événements préci-
805 pitants de l'été à des échelles de temps quotidiennes et sous-quotidiennes, ainsi que des
806 phénomènes associés comme les rafales de vent, la grêle ou la foudre et également pour
807 fournir des informations fiables aux modèles d'impact.

808 Sur l'Europe, selon le scénario RCP8.5 et pour la fin du siècle, Ban et al (2015, 2020)
809 indiquent une augmentation de l'intensité des précipitations extrêmes horaires estivales
810 suivant le taux de Clausius-Clapeyron, sur un domaine s'étendant du nord de l'Italie au
811 nord de l'Allemagne, alors que Kendon et al (2014) montrent une évolution des précipita-
812 tions horaires extrêmes estivales selon un taux de super Clausius-Clapeyron pour le sud

813 de l'Angleterre. Lenderink et al (2019) s'intéressent à l'évolution des précipitations ho-
 814 raires les plus extrêmes, dans une zone Méditerranée terrestre, selon une approche dite de
 815 "Pseudo-Global Warming" (PGW) idéalisée considérant un réchauffement de deux degrés
 816 appliqué aux conditions latérales du modèle : ils montrent une augmentation de +12 à
 817 +16% par degré de réchauffement, soit entre 1,5 et 2 fois le taux de Clausius-Clapeyron, ce
 818 qui correspond à un super Clausius-Clapeyron. Toutefois, la technique du PGW ne prend
 819 pas en compte d'éventuels changements de la circulation de grande échelle qui pourraient
 820 impacter les changements dans les pluies extrêmes futures.

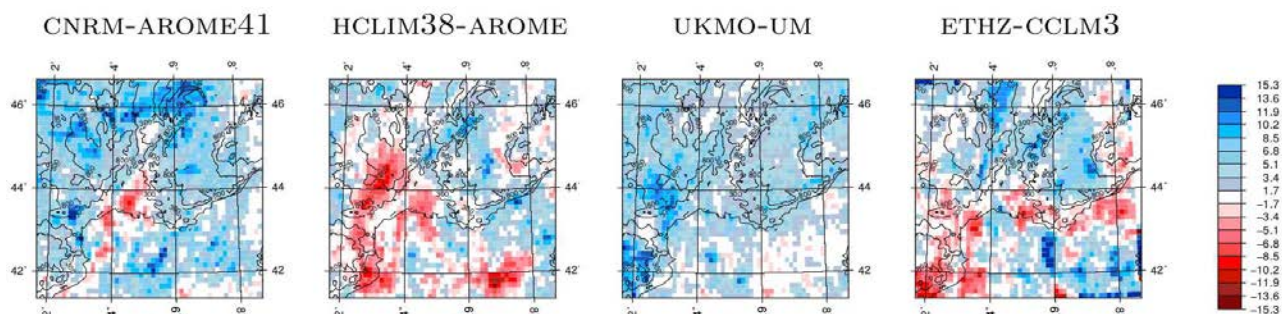


FIGURE 1.32 – Changements des percentiles 99.9% de précipitation horaire par degré de réchauffement (%/°C) entre les périodes historique (1996-2005) et fin de siècle (2090-2099) pour un ensemble de quatre CP-RCMs pour le sud-est de la France (Fumière, 2019)

821 La thèse de Quentin Fumière (Fumière, 2019) a constitué une première étude multi-
 822 modèle avec des CP-RCMs sur l'évolution future des précipitations extrêmes de l'automne
 823 dans le sud-est de la France. Un ensemble de simulations de 10 ans pour quatre CP-
 824 RCMs (CNRM-AROME, HCLIM-AROME, UKMO-UM et ETHZ-CCLM) ne montre pas
 825 d'évolution significative des précipitations extrêmes à la fin du siècle sur la zone étudiée
 826 (cf. Figure 1.32). Il n'y a même pas d'accord entre les modèles sur le signe du changement
 827 attendu, ce qui peut laisser penser que la variabilité naturelle du climat domine la réponse
 828 future des précipitations extrêmes sur des périodes courtes de seulement 10 ans et avec un
 829 ensemble relativement petit.

830 Fumière (2019) montre également qu'en analysant une simulation de scénario longue de
 831 30 ans avec CNRM-AROME, une augmentation des précipitations extrêmes quotidiennes
 832 et surtout horaires est projetée en fin de siècle sur les Cévennes et plus particulièrement
 833 sur le Roussillon où l'augmentation des précipitations horaires pourrait dépasser les 15%
 834 par degré de réchauffement (soit un super Clausius-Clapeyron) (cf. Figure 1.33). Toutefois,
 835 si cette étude montre l'importance de faire des simulations sur des périodes plus longues
 836 que dix ans pour s'affranchir de la variabilité naturelle, elle est basée sur un seul couple
 837 CP-RCM/GCM et ne peut donc fournir une réponse robuste pour les changements futurs
 838 de pluies extrêmes sur le sud-est de la France.

839 Ainsi, les premières études avec des CP-RCMs montrent des réponses différentes sui-
 840 vant les couples CP-RCM/GCM pour les pluies extrêmes méditerranéennes. Mais, si les
 841 CP-RCMs semblent constituer l'outil de modélisation approprié (cf. Table 1.1), leur po-
 842 tentiel commence seulement à être exploité pour l'étude des épisodes méditerranéens. Leur
 843 utilisation va toutefois pouvoir s'amplifier grâce à la mise en place d'un cadre de recherche

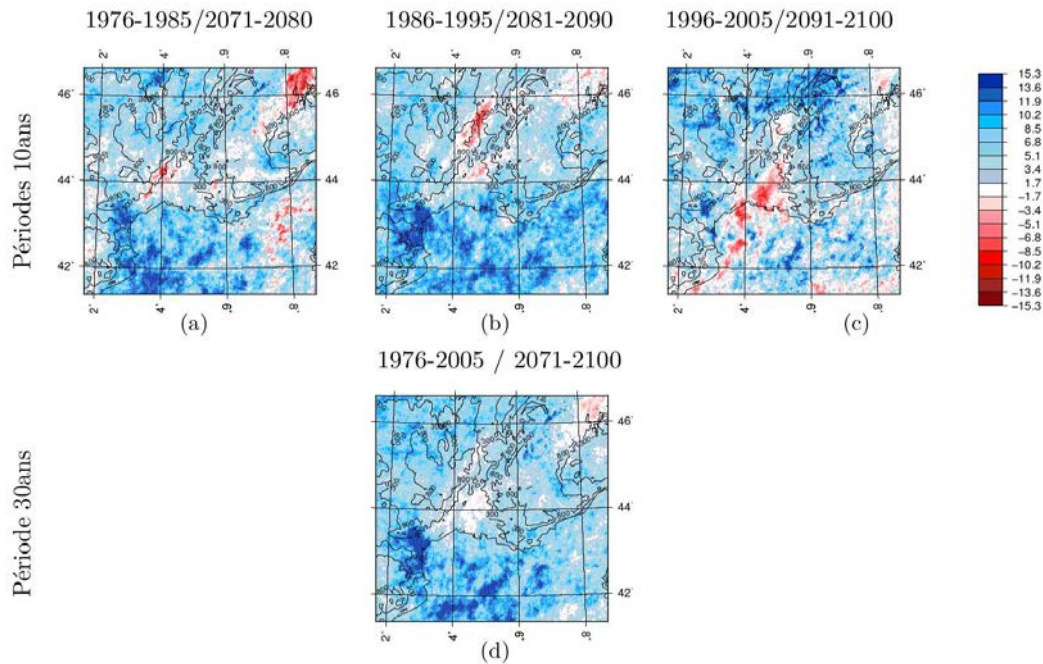


FIGURE 1.33 – Comparaison des changements des percentiles 99.9% de précipitation horaire par degré de réchauffement ($\%/^{\circ}\text{C}$) entre les périodes historique et fin de siècle pour le CP-RCM CNRM-AROME entre trois périodes de 10 ans et une période de 30 ans (Fumière, 2019)

844 adapté et l'émergence d'ensembles de simulations de CP-RCMs qui permettront d'augmen-
 845 ter la robustesse des réponses apportées.

846 1.3.5 Le cadre de recherche européen pour les études avec des 847 CP-RCMs

848 Un programme international et un projet européen ont été mis en place ces dernières
 849 années pour permettre une coordination des simulations et études multi-modèles avec des
 850 CP-RCMs à l'échelle européenne.

851 Tout d'abord, l'exercice international WCRP-CORDEX FPS on Convective phenomena
 852 at high resolution over Europe and the Mediterranean² (Coppola et al, 2020), appelé par la
 853 suite FPS Convection, a commencé en 2016 et a regroupé jusqu'à une trentaine de groupes
 854 de recherche, utilisant 6 familles de CP-RCMs différentes (AROME, RegCM, CCLM, WRF,
 855 REMO, UM). Piloté par Erika Coppola (ICTP) et Stefan Sobolowski (NORCE), cet exer-
 856 cice avait pour but de coordonner la communauté scientifique européenne de modélisation
 857 régionale du climat à haute résolution et de répondre aux questions suivantes :

- 858 1. Comment vont évoluer les événements convectifs et les phénomènes extrêmes associés,
 859 en réponse au changement climatique ?
- 860 2. La meilleure représentation des processus convectifs et des précipitations à des échelles

2. World Climate Research Programme - COordinated Regional Downscaling EXperiment - Flagship Pilot Study on Convection - <https://www.hymex.org/cordexfps-convection/wiki/doku.php>

861 où la convection peut être résolue (utilisation de CP-RCMs), permet-elle d'augmenter
862 notre confiance dans leurs projections ?

863 3. Est-il possible de remplacer les coûteux CP-RCMs par des approches de descente
864 d'échelle statistique, telles que des "émulateurs de convection" qui sont alimentés par
865 des RCMs et imitent les CP-RCMs? Cette question a finalement été peu abordée
866 dans ce cadre, mais a donné lieu à la thèse d'Antoine Doury (Doury, 2022).

867 Afin de donner le plus de cohérence et de robustesse possible aux études du FPS Convec-
868 tion, la communauté s'est, tout d'abord, mis d'accord sur un domaine pan-Alpin commun,
869 nommé ALP-3 (cf. Figure 1.34). Un protocole commun a ensuite été défini pour les simula-
870 tions, notamment, une résolution horizontale comprise entre 1 et 3 km, le choix du scénario
871 RCP8.5 pour les projections et la définition de périodes de 10 ans communes en évalua-
872 tion (2000-2009), historique (1996-2005), milieu (2041-2050) et fin de siècle (2090-2099).
873 Ce programme qui s'est terminé fin 2022 a servi de cadre à cette thèse avec la réalisation
874 de simulations et le partage des données, la participation aux nombreuses études multi-
875 modèles et l'intégration à une communauté très dynamique par des échanges fréquents et
876 lors des workshops annuels.

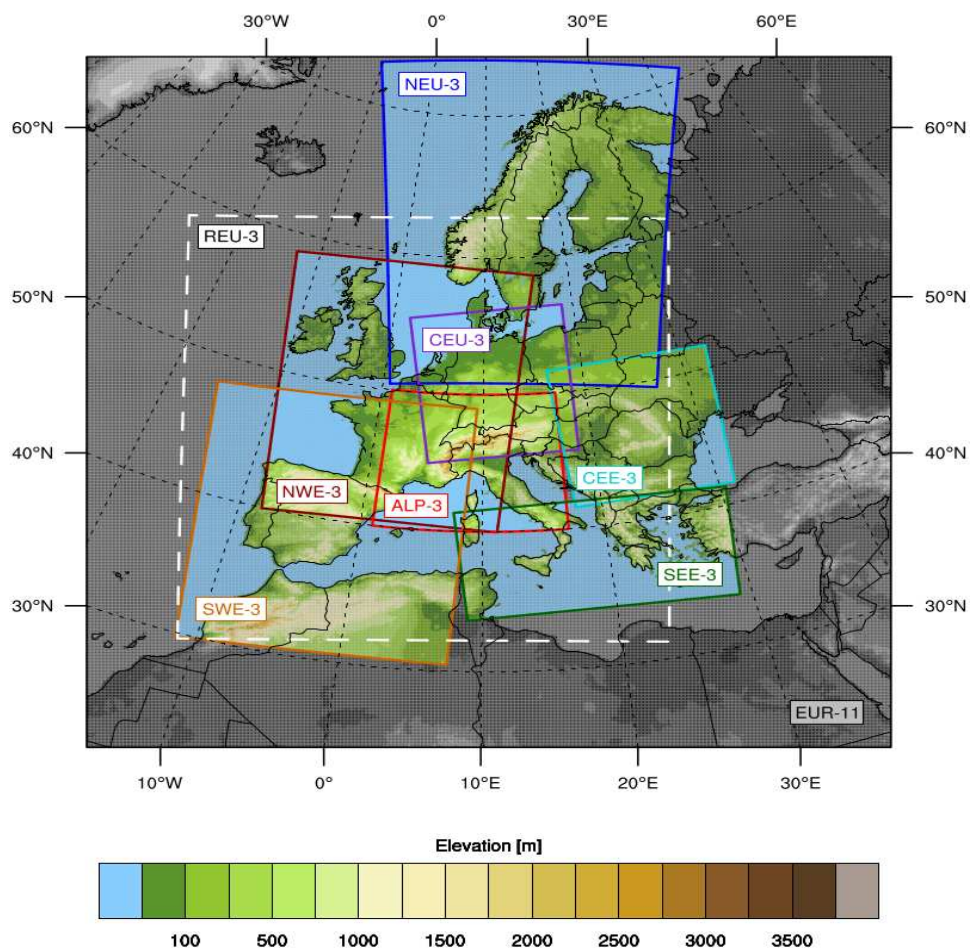


FIGURE 1.34 – Les différents sous-domaines européens définis dans le cadre du projet EUCP et le domaine commun ALP-3 du FPS Convection (Figure : C. Caillaud)

877 Le projet européen de recherche H2020-EUCP³ (EUropean Climate Prediction) a dé-
 878 marré fin 2017. Son but était de mettre au point un système régional européen de prévision
 879 du climat couvrant les échelles de temps allant des saisons aux décennies et conçu pour
 880 soutenir l'adaptation au changement climatique et la prise de décisions d'atténuation à
 881 l'échelle locale, nationale et mondiale, pour les 40 prochaines années. En particulier, le
 882 groupe de travail 3 (WP3) avait pour but de développer un démonstrateur de phénomènes
 883 météorologiques à fort impact à l'échelle régionale et locale dans le cadre du changement
 884 climatique, en utilisant des CP-RCMs. Dix groupes de recherche participaient au WP3,
 885 utilisant 6 familles de CP-RCMs. L'Europe continentale a été découpée en sous-domaines
 886 qui ont été répartis entre les groupes de recherche (cf. Figure 1.34) et des simulations ont
 887 également été réalisées sur quelques régions Outre-Mer (Antilles, Madère et Canaries et
 888 pour le CNRM, île de la Réunion). Ce projet qui s'est terminé courant 2022 a également
 889 servi de cadre à cette thèse avec la réalisation de simulations sur le domaine Nord-Ouest
 890 de l'Europe (NWE-3) et le partage des données, la participation à la rédaction de rapports
 891 du projet, aux échanges et réunions du WP3 et assemblées générales d'EUCP.

892 1.4 L'approche objet appliquée aux pluies extrêmes

893 Pour étudier les précipitations extrêmes, deux approches statistiques sont maintenant
 894 possibles : l'approche eulérienne ("on se place en un point fixe donné") utilisée classique-
 895 ment en climat jusqu'à présent et l'approche lagrangienne ("on suit le système précipitant
 896 au cours du temps") possible depuis récemment grâce à la bonne représentation des préci-
 897 pitations horaires par les modèles de climat à haute résolution (cf. Figure 1.35).

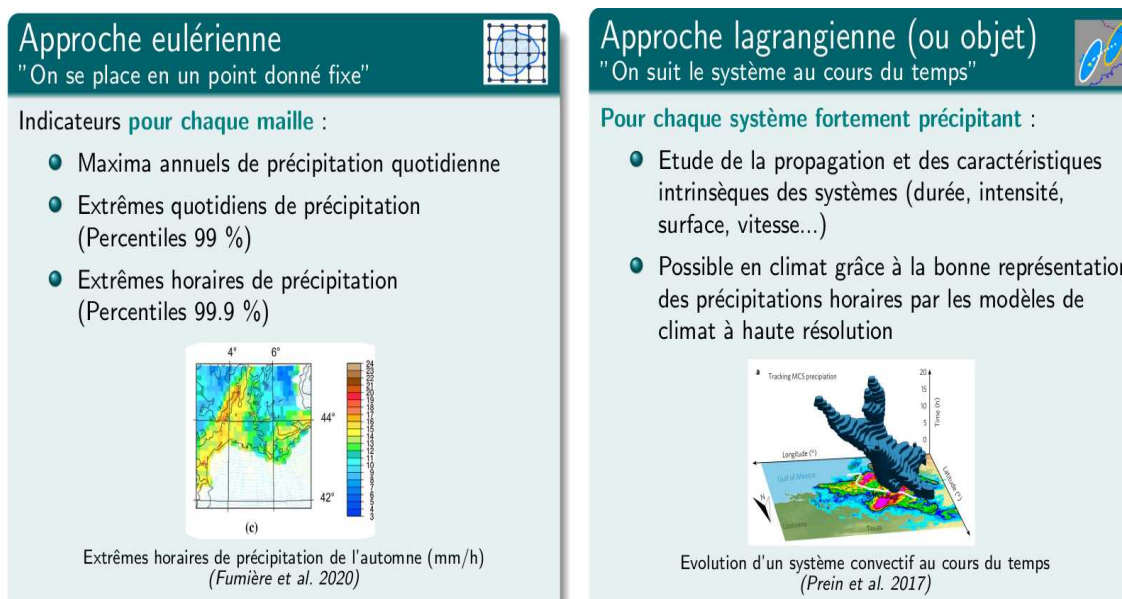


FIGURE 1.35 – Les approches eulérienne et lagrangienne pour l'étude des pluies extrêmes en climat

3. <https://www.eucp-project.eu/>

898 Les indicateurs eulériens les plus fréquemment utilisés sont le maximum annuel de pré-
899 cipitation quotidienne (RX1day), les valeurs de précipitation quotidienne avec des durées
900 de retour de 20 ans, les percentiles 99% pour les précipitations quotidiennes et 99.9% pour
901 les précipitations horaires (sur l'ensemble des jours/heures ou seulement les jours/heures
902 de pluie). Certains de ces indicateurs se limitent à une indication d'évolution d'intensité
903 et d'autres ne permettent pas de séparer les évolutions de fréquence et d'intensité des
904 pluies extrêmes, ce qui peut rendre leur interprétation difficile, en particulier de la zone
905 méditerranéenne où intensité et fréquence n'évoluent pas forcément dans le même sens.
906 Ainsi, le RX1day se base sur une valeur maximale unique par année et s'il y a plusieurs
907 épisodes intenses la même année à un endroit donné, seul le plus intense sera pris en compte.
908 Cela peut s'avérer particulièrement problématique dans le cas des épisodes méditerranéens
909 qui présentent une forte variabilité interannuelle.

910 Jusqu'à récemment donc, les modèles de climat ne permettaient pas de quitter cette
911 approche eulérienne statistique classique, mais grâce à la bonne représentation des précipi-
912 tations horaires et des systèmes convectifs, les CP-RCMs nous permettent d'aller au-delà
913 et de mettre en place un suivi lagrangien orienté objet pour étudier la propagation et les
914 caractéristiques intrinsèques des systèmes convectifs (nombre, durée, surface, vitesse de
915 déplacement, ...). Cette approche devrait donc nous permettre de bien séparer les change-
916 ments de fréquence et d'intensité et de caractériser de manière plus exhaustive les systèmes
917 précipitants. De plus, les épisodes méditerranéens, de par leur échelle spatio-temporelle et
918 l'organisation de la convection associée, se prêtent particulièrement à l'application de cette
919 méthode.

920 Cette nouvelle approche orientée objet implique la mise en œuvre d'un algorithme de
921 détection et de suivi des systèmes précipitants (appelé également outil de tracking ou tra-
922 cker). Différentes méthodes de tracking existent déjà, certaines provenant de la vérification
923 des modèles de prévision numérique du temps ou de méthodes de prévision immédiate et
924 de suivi des systèmes convectifs. D'autres ont été développées spécifiquement pour l'étude
925 des systèmes convectifs dans les CP-RCMs. Cette partie reprend les principaux points de
926 l'annexe C1 de Caillaud et al (2021) qui fait un bilan non exhaustif des méthodes de suivi
927 objet existantes appliquées aux systèmes précipitants.

- 928 • L'algorithme MODE

929 Aux États-Unis, la méthode orientée objet utilisée pour évaluer les prévisions de pré-
930 cipitation des modèles opérationnels à haute résolution, appelée MODE (Davis et al,
931 2006, 2009), a été appliquée par Prein et al (2020) à des cumuls horaires de précipita-
932 tion de simulations climatiques avec le modèle WRF à 4 km afin d'évaluer la capacité
933 du modèle à reproduire les MCSs, ainsi que pour leur évolution future (Prein et al,
934 2017) (cf. Figure 1.36 a). Après un lissage sur 8 points de grille, le seuil de 5 mm/h
935 est utilisé pour détecter les cellules contiguës qui sont ensuite appariées spatialement
936 et temporellement avec une taille minimale des systèmes de 2000 points de grille sur
937 l'ensemble de leur durée de vie. Le même algorithme a été appliqué pour caractériser
938 les précipitations dans l'ouest du Canada par Li et al (2020).

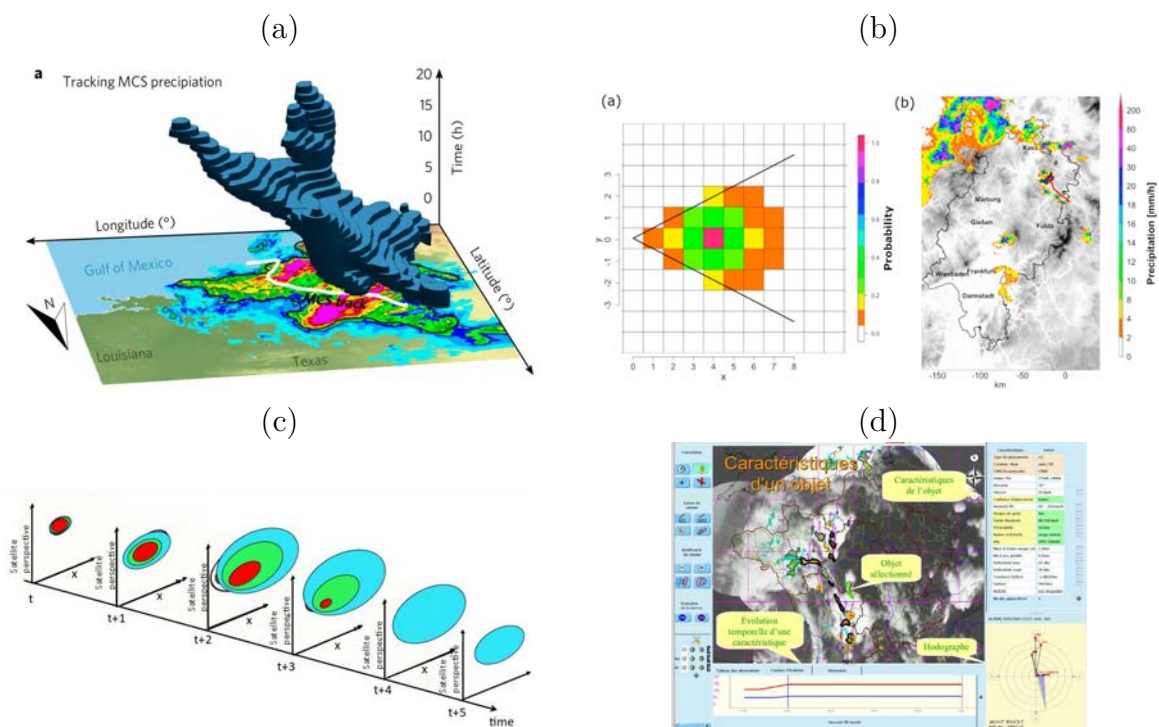


FIGURE 1.36 – (a) Illustration de l’algorithme MODE, utilisé pour le suivi lagrangien des MCSs avec les cumuls horaires de précipitations supérieures à 5 mm/h, suivis dans l’espace et le temps (le temps correspond à l’axe vertical) (Prein et al, 2017) (b) Illustration de l’algorithme développé à l’Université de Francfort avec les probabilités de détection et un instantané d’image radar 5 min avec la détection d’une cellule et sa trajectoire matérialisée par une ligne rouge (Purr et al, 2019) (c) Illustration de l’algorithme TOOCAN de détection des MCSs sous les Tropiques en quatre dimensions à partir des températures de brillance d’images satellitaires infrarouge (Fioleau and Roca, 2013) (d) Illustration de l’outil OPIC-radar (Objet de Prévision Immédiate de la Convection) utilisé à Météo-France en prévision immédiate pour le suivi et la qualification des zones orageuses à partir des images réflectivités radar 5 min (Source : Météo-France)

939

- L’algorithme de l’Université de Francfort

940

En Allemagne, une méthode de suivi des cellules convectives sur des champs de précipitations de 5 min dépassant le seuil de 8.5 mm/h a été développée pour vérifier si le CP-RCM COSMO-CLM (2.8 km) reproduisait bien les caractéristiques des cellules convectives infra-quotidiennes (Brisson et al, 2018; Purr et al, 2019), mais aussi pour caractériser leur évolution future (Purr et al, 2021, 2022) (cf. Figure 1.36 b).

941

942

943

944

- L’algorithme DYMECS

945

Un algorithme développé par Stein et al (2014) et utilisant le seuil de 1 mm/h a été appliqué aux simulations du CP-RCM UM du Met Office et aux observations pour évaluer la représentation des cycles de vie des systèmes convectifs d’Afrique de l’Ouest (Crook et al, 2019). Cette méthode a été appliquée récemment pour caractériser l’évolution des systèmes convectifs sur un domaine pan-européen à partir de simulations des CP-RCMs de UM-UKMO et CCLM-ETHZ (Chan et al, 2023). Fitzpatrick et al (2020) appliquent une méthode similaire aux champs d’ORL (Out-

946

947

948

949

950

951

952

953 going Longwave Radiation) d'un CPM d'une résolution de 4.4 km afin de suivre
954 les MCSs dans le Sahel ouest-africain. Des études sur les MCSs dans le Midwest
955 américain ont également été réalisées par Haberlie and Ashley (2019) à l'aide d'une
956 méthode de suivi basée sur les réflectivités radar observées et simulées.

957 Par ailleurs, d'autres algorithmes de suivi ont déjà été appliqués au modèle AROME.

958 • L'algorithme TOOCAN

959 Cet algorithme, développé pour détecter les MCSs et basé sur des images satellitaires
960 infrarouge (Fiolleau and Roca, 2013) (cf. Figure 1.36 c), a été appliqué par
961 Beucher et al (2014) aux champs de précipitations horaires de simulations courtes du
962 modèle AROME dans les tropiques.

963 • Les outils de prévision immédiate utilisés à Météo-France

964 Les outils orientés objet sont utilisés depuis de nombreuses années dans le domaine de
965 la prévision immédiate. Au CNRM, l'algorithme de suivi ISIS (Instrument de Suivi
966 dans l'Imagerie Satellitaire) développé par Morel and Senesi (2002a) et basé sur l'ima-
967 gerie satellitaire infrarouge pour caractériser les MCSs européens (Morel and Senesi,
968 2002b) est à l'origine d'une version opérationnelle utilisée en prévision immédiate et
969 appelée RDT pour Rapid Developing Thunderstorm. Une déclinaison de cet algo-
970 rithme, appliquée à des réflectivités radar 5 min pour surveiller les zones actives de
971 précipitation (cf. Figure 1.36 d) et appelée OSIRIS (Outils de Suivi dans l'Imagerie
972 Radar et Infra-rouge Satellitaire), a également été développée. Brousseau et al (2016)
973 ont utilisé cet algorithme pour caractériser les améliorations dans la simulation des
974 cellules convectives des réflectivités radar simulées par AROME lors du passage de
975 2.5 et 1.3 km de résolution du modèle de PNT.

976 L'utilisation de cette nouvelle approche orientée objet, rendue possible par la bonne
977 représentation des systèmes précipitants à l'échelle horaire par les CP-RCMs, ouvre de
978 nouvelles perspectives pour l'étude des épisodes méditerranéens et de leur évolution fu-
979 ture, pour lesquelles elle n'a encore jamais été utilisée. Elle devrait notamment permettre
980 de séparer les changements de fréquence et d'intensité, et également de caractériser les
981 différentes propriétés des systèmes précipitants qui les composent.

1.5 Objectifs de la thèse et organisation du manuscrit

1.5.1 Objectifs

Comme nous l'avons vu dans cette introduction, les systèmes convectifs à l'origine des épisodes méditerranéens, de par leur diversité, leur complexité, ainsi que leur impact sur la société, nécessitent d'être encore mieux compris et mieux prévus, et cela à toutes les échelles de temps. En particulier, concernant les échelles de temps climatiques, il existait, jusqu'à récemment, un schisme entre les échelles spatio-temporelles de ces systèmes et les outils numériques de modélisation du climat. Ce schisme constitue, en effet, un verrou scientifique qui reposait sur une différence d'échelles spatio-temporelles entre les systèmes convectifs (jusqu'à quelques kilomètres et quelques heures, voire moins) et les modèles climatiques globaux (GCM dans CMIP, ~ 150 km) et même régionaux (RCM dans CORDEX, ~ 12 km) qui représentent mal les échelles spatio-temporelles en jeu. Leur résolution encore grossière ne leur permet pas de représenter correctement la topographie complexe du nord-ouest de la Méditerranée qui joue un rôle important dans la formation et le déplacement des systèmes fortement précipitants de l'automne. De plus, la paramétrisation de la convection profonde induit une source d'incertitude et d'erreur importante avec une mauvaise représentation des mécanismes de déclenchement, d'organisation et de maintien de la convection. Ces différentes limitations ne permettent pas à ces modèles de représenter correctement les épisodes méditerranéens et les pluies extrêmes associées.

Or, depuis quelques années, il est possible d'utiliser des modèles de climat à haute résolution (Convection-Permitting Regional Climate Model ou CP-RCM, 1-3 km) dont la convection profonde est explicite, basés sur des CPMs qui ont déjà démontré leur valeur ajoutée en PNT et pour des études de cas pour la représentation des précipitations extrêmes méditerranéennes. Les premières études utilisant les CP-RCMs sur de plus longues simulations climatiques démontrent la valeur ajoutée de cette nouvelle génération de modèles de climat par rapport aux RCMs, en particulier pour la représentation statistique des pluies extrêmes et à l'échelle horaire. Quelques études semblent démontrer que ces modèles constituent des outils de modélisation adaptés pour l'étude des épisodes méditerranéens, même si pour l'instant, la valeur ajoutée de ces nouveaux modèles n'a été établie que sur des périodes relativement courtes, des domaines géographiques restreints et pour des statistiques eulériennes qui ne prennent pas en compte les caractéristiques intrinsèques des systèmes convectifs.

La bonne représentation des systèmes précipitants à l'échelle horaire par les CP-RCMs ouvre également de nouvelles perspectives en termes d'analyse. En effet, cette nouvelle génération de modèle de climat permet de dépasser l'approche statistique eulérienne et de mettre en œuvre des méthodes orientées objet qui se basent sur une approche lagrangienne et utilisent des algorithmes de détection et de suivi des systèmes précipitants pour caractériser les différentes propriétés de ces systèmes (durée de vie, surface, intensité, volume...). Dans le même temps, l'augmentation de la puissance de calcul des super-calculateurs permet de réaliser des simulations plus longues et sur des domaines plus larges avec des CP-RCMs. Des initiatives au niveau international et européen permettent également la

1023 réalisation et la mise à disposition d'un ensemble de simulations de CP-RCMs sur des do-
1024 maines communs et en particulier sur un domaine pan-alpin défini pour bien représenter
1025 les épisodes méditerranéens du nord-ouest de la Méditerranée. Enfin, de nouvelles bases
1026 de données observées à haute résolution temporelle et spatiale, indispensables pour l'éva-
1027 luation de ces modèles, commencent à devenir disponibles pour des périodes suffisamment
1028 longues. La combinaison de ces différentes avancées va donc maintenant permettre de réali-
1029 ser une évaluation plus appropriée et plus robuste de la capacité de ces nouveaux outils de
1030 modélisation climatique à reproduire les systèmes convectifs à l'origine des pluies intenses
1031 méditerranéennes.

1032 Or, les épisodes méditerranéens sont des événements météorologiques à fort impact
1033 avec des conséquences hydrologiques et géologiques qui peuvent entraîner des dommages
1034 humains et matériels considérables. L'étude de leur évolution aux échelles climatiques fu-
1035 tures revêt donc une grande importance pour la société et constitue un défi à relever pour
1036 la communauté de modélisation régionale du climat.

1037 S'il n'y a pas consensus à l'échelle de la Méditerranée pour l'évolution observée des pluies
1038 extrêmes, plusieurs études s'accordent sur une intensification et une augmentation de la
1039 fréquence des événements les plus intenses sur le sud-est de la France depuis le milieu de 20e
1040 siècle. Pour leur évolution future, une intensification globale des précipitations quotidiennes
1041 extrêmes est attendue en réponse au réchauffement, suivant la loi de Clausius-Clapeyron,
1042 de l'ordre de +7% par degré supplémentaire. Mais les études existantes sur l'évolution des
1043 pluies extrêmes dans le bassin méditerranéen font état d'importantes incertitudes, ce qui
1044 constitue un second verrou scientifique. En effet, que ce soit avec des GCMs ou des RCMs,
1045 des divergences parfois fortes apparaissent dans les études qui s'intéressent à l'évolution
1046 future de ces phénomènes extrêmes et il n'y a pas d'accord clair entre les modèles pour
1047 les changements en termes d'intensité. Mon hypothèse de travail est que cette incertitude
1048 pourrait provenir d'une diminution de la fréquence des conditions météorologiques favo-
1049 rables à ces événements extrêmes liée à des changements de dynamique de grande échelle,
1050 qui compenserait les augmentations thermodynamiques des pluies extrêmes, liées à l'aug-
1051 mentation de l'humidité résultant du réchauffement. Enfin, jusqu'à ces dernières années, le
1052 schisme entre complexité des systèmes convectifs méditerranéens et les outils de modélisa-
1053 tion climatique existants empêchait d'établir avec confiance les changements attendus dans
1054 la distribution des précipitations intenses dans un contexte de changement climatique.

1055 Dans les premières études de projections climatiques avec des CP-RCMs, l'on retrouve
1056 également des divergences, avec une réponse des systèmes convectifs au changement cli-
1057 matique qui pourrait ne pas être linéaire, différer d'une région à l'autre en suivant une
1058 relation sous Clausius-Clapeyron ou localement super Clausius-Clapeyron. Il faut noter
1059 que, jusqu'à présent, ces études reposent sur une seule simulation de CP-RCM forcé par
1060 un GCM donné ou sur des ensembles très restreints et des périodes courtes, ce qui limite
1061 la robustesse des résultats.

1062 L'utilisation plus large des CP-RCMs qui semblent constituer l'outil adéquat pour la
1063 représentation des épisodes méditerranéens devrait donc ouvrir de nouvelles perspectives
1064 pour l'étude de l'évolution future de ces phénomènes extrêmes. Dans le même temps, l'aug-
1065 mentation de la puissance de calcul permet des simulations plus longues et plus nombreuses,

1066 avec, grâce aux coordinations internationale et européenne, la mise à disposition d'un en-
1067 semble de projections climatiques avec des CP-RCMs sur le domaine pan-alpin. Enfin,
1068 l'utilisation de la méthode d'analyse orientée objet qui n'a encore jamais été utilisée pour
1069 les pluies méditerranéennes, devrait également apporter un nouvel éclairage pour l'étude
1070 des épisodes méditerranéens et de leur évolution future. Elle devrait notamment permettre
1071 de séparer les changements de fréquence et d'intensité, et également de caractériser l'évo-
1072 lution des différentes propriétés des systèmes précipitants qui les composent, en réponse
1073 au réchauffement climatique.

1074 Cette thèse a donc pour objectif de déterminer la réponse des événements de préci-
1075 pitations intenses du nord-ouest de la Méditerranée au changement climatique d'origine
1076 humaine, en s'appuyant sur la nouvelle génération de modèles de climat à haute résolution
1077 qui résolvent explicitement la convection profonde et en mettant en œuvre une approche
1078 orientée objet permettant de détecter et suivre les systèmes convectifs à l'origine de ces
1079 précipitations intenses.

1080 1.5.2 Questions scientifiques

1081 **Les événements précipitants intenses méditerranéens sont-ils bien représen-**
1082 **tés par les modèles régionaux de climat à convection profonde résolue ?**

1083 Dans le cadre de cette thèse, il s'agit tout d'abord de mettre en œuvre le CP-RCM
1084 développé au CNRM, CNRM-AROME, pour réaliser une longue simulation climatique
1085 d'évaluation (38 ans) sur la zone d'intérêt, puis d'évaluer la performance de ce modèle et
1086 d'établir la valeur ajoutée par rapport au RCM CNRM-ALADIN pour les épisodes mé-
1087 diterranéens de l'automne, par comparaison avec des bases de données observées à haute
1088 résolution de référence. Enfin, la capacité de ce modèle à simuler explicitement des sys-
1089 tèmes convectifs de fine échelle ouvre la possibilité inédite de suivre la trajectoire de ces
1090 phénomènes et d'évaluer leur propriétés, toujours par comparaison à des observations de
1091 référence ayant fait l'objet de la même méthode de tracking.

1092 Cette évaluation est également étendue à un ensemble multi-modèle de simulations
1093 d'évaluation de dix ans, disponibles dans le cadre du CORDEX-FPS Convection, et égale-
1094 ment aux simulations historiques pour vérifier que les caractéristiques des systèmes convec-
1095 tifs sont bien représentées par les CP-RCMs dans les simulations en climat présent.

1096 **Que révèlent les modèles de dernière génération sur la réponse de ces phé-**
1097 **nomènes au changement climatique et quelles sont les incertitudes associées ?**

1098 Dans le cadre de cette thèse, il s'agit de réaliser des simulations avec le CP-RCM CNRM-
1099 AROME pour des périodes historique, scénario milieu de siècle et fin de siècle. L'approche
1100 orientée objet est ensuite appliquée à l'ensemble multi-modèle du FPS Convection, avec
1101 une dizaine de simulations de dix ans disponibles, dont celles de CNRM-AROME, pour
1102 déterminer l'évolution future des épisodes méditerranéens dans un contexte de changement
1103 climatique. Il s'agit, en particulier, de déterminer les caractéristiques des événements pour
1104 lesquels on obtient des résultats robustes et celles où les incertitudes restent importantes,

1105 dans un cadre multi-GCM, multi-RCM, multi-CP-RCM et multi-niveaux de réchauffement
1106 (de par les deux horizons temporels).

1107 **1.5.3 Organisation du manuscrit**

1108 A la suite de cette introduction, la thèse s’articule selon trois chapitres suivis d’une
1109 conclusion.

1110 **Le Chapitre 2** présente les données de référence, les caractéristiques des modèles de
1111 climat utilisés et en particulier du CP-RCM CNRM-AROME, les simulations réalisées,
1112 l’approche multi-modèle et l’approche objet mises en œuvre.

1113 A travers l’article Caillaud et al (2021) publié dans la revue *Climate Dynamics*, **le**
1114 **Chapitre 3** présente les résultats de l’évaluation de la valeur ajoutée du CP-RCM CNRM-
1115 AROME par rapport au RCM CNRM-ALADIN sur les précipitations extrêmes pour les
1116 épisodes méditerranéens (simulations de 38 ans), puis l’évaluation par une méthode orientée
1117 objet pour une période de 20 ans en comparant les caractéristiques des systèmes convectifs
1118 méditerranéens simulées par le CP-RCM à celles des systèmes observés. Ce chapitre com-
1119 prend également l’évaluation mettant en oeuvre la même approche objet pour un ensemble
1120 de 14 simulations d’évaluation de CP-RCMs du FPS Convection et un résumé d’une étude
1121 d’évaluation multi-tracker, multi-modèle réalisée avec trois autres chercheurs européens
1122 utilisant des outils de tracking (Müller et al, 2022).

1123 **Le Chapitre 4** présente une étude multi-modèle basée sur un ensemble de 14 simu-
1124 lations de CP-RCM sur l’évolution future des épisodes méditerranéens, en milieu et fin
1125 de siècle, avec une approche orientée objet, à travers un article en révision dans la revue
1126 *Geophysical Research Letters*.

1127 **Le Chapitre 5** présente les conclusions et les pistes de recherche pour la poursuite de
1128 ce travail.

1129 **Chapitre 2**

1130 **Données d’observation, de modèles et**
1131 **méthodologie**

1132 **Sommaire**

1133	2.1 Les données d’observation de référence	53
1134		
1135	2.1.1 Le choix des bases de données d’observation	53
1136	2.1.2 COMEPHORE sur la France métropolitaine	54
1137	2.1.3 RadissagH sur la Suisse	56
1138	2.1.4 RADKLIM sur l’Allemagne	57
1139	2.1.5 GRIPHO sur l’Italie	57
1140	2.1.6 EURO4M-APGD sur le domaine pan-alpin	57
1141	2.1.7 Les limites des jeux de données d’observation	57
1142	2.2 La chaîne de modélisation du climat au CNRM	58
1143	2.2.1 La réanalyse globale ERA-Interim	58
1144	2.2.2 CNRM-CM5	59
1145	2.2.3 CNRM-ALADIN	60
1146	2.2.4 CNRM-AROME	62
1147	2.2.5 Protocole d’une simulation climatique avec CNRM-AROME . . .	67
1148	2.3 Les simulations climatiques avec CNRM-AROME pour l’étude	
1149	des épisodes méditerranéens	72
1150	2.3.1 La simulation d’évaluation	73
1151	2.3.2 Les simulations en climat présent et futur	76
1152	2.4 L’ensemble multi-modèle du CORDEX-FPS Convection . . .	78
1153	2.5 L’approche orientée objet pour la détection et le suivi des	
1154	épisodes méditerranéens	83
1155	2.5.1 Choix de l’algorithme	83
1156	2.5.2 Principe	85
1157	2.5.3 L’indice de sévérité	88
1158	2.5.4 Les distributions spatiales de systèmes précipitants ou densités .	88
1159	2.5.5 Les graphes de type Intensity Duration Frequency (IDF) et In-	
1160	tensity Area Frequency (IAF)	89

1161	2.5.6	Les graphes de type "Bubble plot"	89
1162	2.5.7	Sélection des systèmes précipitants appartenant aux épisodes mé-	
1163		diterranéens français	90
1164	2.5.8	Domaines de tracking	92
1165	2.6	Outils complémentaires	92
1166	2.6.1	Grilles de référence, interpolation et spin-up spatial	92
1167	2.6.2	Significativité statistique par une méthode de bootstrap	93

1168
1170

1171 2.1 Les données d’observation de référence

1172 Dans le Chapitre 3, mais également dans une partie du Chapitre 4, l’objectif sera
1173 d’évaluer la capacité des modèles de climat à haute résolution à représenter correctement
1174 les phénomènes fortement précipitants, que ce soit pour les simulations d’évaluation ou
1175 les simulations historiques (définies dans la Section 2.3), en comparant les précipitations
1176 simulées à des bases de données d’observation de référence.

1177 2.1.1 Le choix des bases de données d’observation

1178 La nouvelle génération de modèles à haute résolution ouvre de nouveaux besoins en
1179 termes de données de référence pour leur évaluation. Une attention particulière doit donc
1180 être portée au choix des bases de données d’observation de référence (Prein et al, 2017). En
1181 effet, celles-ci doivent avoir des résolutions spatiale et temporelle adaptées, c’est-à-dire ki-
1182 lométrique et horaire, tout en étant disponibles sur des périodes aussi longues que possible.
1183 De plus, nous nous intéressons aux précipitations, un paramètre particulièrement difficile
1184 à estimer en raison de sa forte variabilité dans l’espace et dans le temps, et aux précipita-
1185 tions extrêmes, c’est-à-dire aux queues de distribution des précipitations qui sont souvent
1186 mal représentées dans les jeux de données observées. Dans mes études, j’ai uniquement
1187 utilisé des jeux de données grillées : les données stations ont été jugées trop ponctuelles
1188 pour donner des conclusions générales sur la performance des modèles, mais leur utilisation
1189 pourrait être envisagée pour affiner certains résultats.

1190 Les jeux de données grillées à résolution trop grossière ou produits à partir de données de
1191 stations trop peu nombreuses ont également été écartés. La résolution de 25 km des analyses
1192 de précipitation par satellite (CMORPH (Joyce et al, 2004) ; TRMM (Huffman et al, 2010)
1193 remplacé à partir de 2015 par GPM (Hou et al, 2011)) est trop grossière pour notre étude,
1194 même si la résolution temporelle (3h) aurait pu convenir. La base de données européenne
1195 E-OBS (Cornes et al, 2018) avec une résolution de 11 km a une résolution temporelle in-
1196 suffisante (quotidienne) et une densité de stations de mesure encore faible sur certaines
1197 régions. Les réanalyses, qui utilisent un modèle atmosphérique pour reconstruire les don-
1198 nées spatiales et temporelles manquantes, sont également écartées. En effet, l’utilisation
1199 d’un modèle entraîne un biais, en particulier pour les précipitations où il dépend fortement
1200 du schéma de convection utilisé (Bosilovich et al, 2008; Parker, 2016) et les réanalyses avec
1201 des modèles à convection profonde résolue ne sont pas encore disponibles. Ainsi, la réana-
1202 lyse de surface européenne MESCAN-SAFRAN du projet UERRA, avec une résolution de
1203 5.5 km, n’est pas utilisée, de même que l’analyse des précipitations à 8 km de SAFRAN
1204 (Durand et al, 1993; Quintana-Segui et al, 2008; Vidal et al, 2011) car les champs de pré-
1205 cipitation horaire résultent de la désagrégation du cumul quotidien par l’utilisation d’un
1206 modèle dont la convection profonde est paramétrisée.

1207 Dès que cela est possible, des jeux de données grillées fusionnant les données ponctuelles
1208 de pluviomètres et les données radar spatialement continues ont été utilisés. En effet, les
1209 données radar compensent la faible densité des pluviomètres et permettent une représen-
1210 tation plus fine des précipitations dans le temps et dans l’espace, permettant une meilleure
1211 localisation et une meilleure prise en compte de l’intensité des pics de précipitation.

1212 Les bases de données utilisées sont décrites dans l'article Caillaud et al (2021) (Chapitre
 1213 3), mais les principaux éléments sont repris ici. Ils sont résumés dans la Table 2.1 et dans la
 1214 Figure 2.1. Des bases de données à haute résolution sont maintenant également disponibles
 1215 sur d'autres pays européens, comme les Pays-Bas ou la Grande Bretagne, et certaines
 1216 d'entre elles ont été utilisées pour l'évaluation de CNRM-AROME sur un domaine Nord-
 1217 Ouest de l'Europe (Lucas-Picher et al, 2023).

<i>Jeux de données</i>	<i>Zone</i>	<i>Disponibilité</i>	<i>Fréquence</i>	<i>Résolution</i>	<i>Type de données</i>	<i>Référence</i>
COMEPHORE	France	1997-2022	Horaire	1km	Pluviomètres +radar	Tabary et al (2012) Fumière et al (2020)
RdisaggH	Suisse	2003-2010	Horaire	1km	Pluviomètres +radar	Wüest et al (2010)
RADKLIM	Allemagne	2001-2020	Horaire	1km	Pluviomètres +radar	Winterrath et al (2017)
GRIPHO	Italie	2001-2016	Horaire	3km	Pluviomètres	Fantini (2019)
EURO4M-APGD	Pan-Alpin	1971-2008	Quotidien	5km	Pluviomètres	Isotta et al (2014)

Tableau 2.1 – Les principales caractéristiques des bases de données d'observation utilisées



FIGURE 2.1 – Les bases de données d'observation de précipitation utilisées pour les analyses quotidiennes (à gauche) et horaires (à droite), limitées au domaine d'analyse ALP-3i qui est défini dans la Section 2.6.1

1218 2.1.2 COMEPHORE sur la France métropolitaine

1219 COMEPHORE (COMbinaison en vue de la Meilleure Estimation de la Précipitation
 1220 HORaiRE) (Tabary et al, 2012; Fumière et al, 2020) est un jeu grillé de données de pré-
 1221 cipitation à haute résolution (1 km, horaire) sur la France métropolitaine, fusionnant les
 1222 données observées issues de radars et de pluviomètres (cf. Figure 2.2). Produit par Météo-
 1223 France, il est disponible à partir de 1997 (date de début de disponibilité des données radar

1224 pour le réseau français ARAMIS) et mis à jour chaque année¹. COMEPHORE avait déjà
1225 servi de données de référence dans la première étude d'évaluation du CP-RCM CNRM-
1226 AROME (Fumière et al, 2020). Comme ce jeu de données est la référence pour notre éva-
1227 luation des précipitations extrêmes sur le sud-est de la France, une description plus détaillée
1228 en est faite ci-après.

1229 Méthode

1230 COMEPHORE est basé sur la fusion entre les données de réflectivité 5 min des radars
1231 locaux et les données d'environ 4000 pluviomètres avec un pas de temps quotidien (cf.
1232 Figure 2.2) et 1200 pluviomètres avec un pas de temps horaire. La chaîne de traitement,
1233 détaillée dans Tabary et al (2012), consiste au calcul des cumuls quotidiens des réflectivités
1234 des radars locaux qui sont corrigés des erreurs de mesure radar et complétés par les don-
1235 nées des pluviomètres. Une interpolation temporelle vers les données horaires est ensuite
1236 réalisée. Depuis 2007, la méthode de traitement a bénéficié de quelques améliorations. En
1237 ajoutant des mesures radar de plusieurs élévations et en utilisant la classification des nuages
1238 par satellite pour déterminer la probabilité de pluie, la fusion quotidienne se fait à par-
1239 tir d'une nouvelle référence, obtenue par la méthode ANTILOPE décrite dans Laurantin
1240 (2008), fusionnant les données radar et pluviomètres avec une séparation entre les pluies
1241 stratiformes et convectives. Puis vingt-quatre cumuls intermédiaires de pluie calculés avec
1242 ANTILOPE sont utilisés pour l'interpolation au pas de temps horaire.

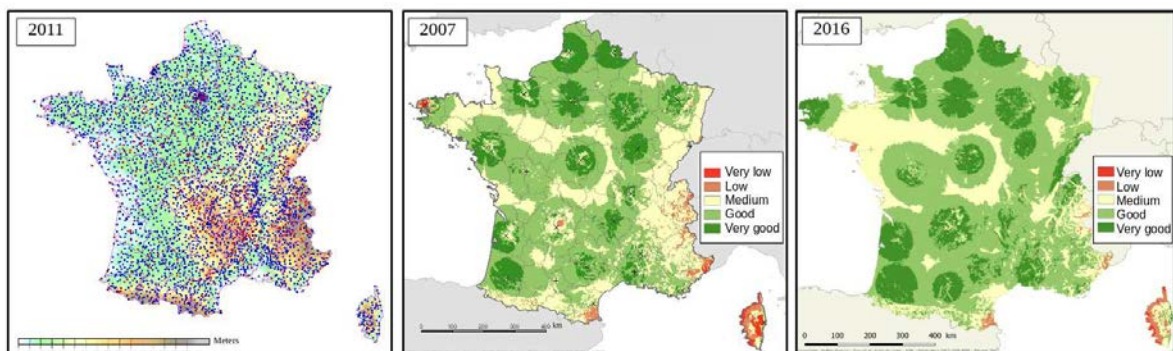


FIGURE 2.2 – A gauche, carte du réseau français de pluviomètres quotidiens en 2011 (3825 stations) ; au milieu et à droite, cartes de la qualité de la mesure radar des précipitations pour le réseau radar français en 2007 et 2016. Source : Météo-France

1243 Avantages

- 1244 • La capacité de COMEPHORE à reproduire une climatologie des précipitations quo-
1245 tidienne a été vérifiée (Roger, 2018), en la comparant à celle d'un jeu de données
1246 à haute résolution (1 km également) résultant d'un krigeage des données pluviomé-
1247 triques quotidiennes sur la France (Lassegues, 2018).
- 1248 • Grâce à sa haute résolution spatiale et à la couverture continue des données radar,
1249 COMEPHORE fournit des informations dans des régions où la densité de stations

1. COMEPHORE est maintenant accessible via le site <https://radarsmf.aeris-data.fr/en/home-page/>

1250 est faible et permet une meilleure représentation des valeurs extrêmes (localisation
1251 et pics de fortes précipitations) (Roger, 2018).

1252 • Fumière et al (2020) ont confirmé que COMEPHORE est un produit plus adapté à
1253 l'étude des précipitations extrêmes de l'automne que la base de données SAFRAN.

1254 **Limitations**

1255 • Si des corrections d'erreurs liées à la mesure radar sont effectuées dans le traitement
1256 de COMEPHORE, un problème d'effet de masque dans les zones de haute altitude
1257 conduit à la sous-estimation des quantités de précipitation dans les zones monta-
1258 gneuses, au-dessus de 1500 m (Roger, 2018). De même, COMEPHORE ne dispose
1259 pas encore de correction prenant en compte l'altitude. Enfin, ces régions sont égale-
1260 ment confrontées à une faible densité de pluviomètres et à des problèmes de mesure
1261 des précipitations en cas de neige ou de vent fort. Les données sont donc de moins
1262 bonne qualité sur une partie des Alpes, des Pyrénées et la partie occidentale de la
1263 Corse (cf. Figure 2.2).

1264 • Alors que le nombre de pluviomètres est plus ou moins constant au cours du temps,
1265 le nombre de radars français a augmenté, surtout au cours des premières années et
1266 dans le sud-est de la France, passant de 10 radars en 1997 à 24 à partir de 2006.
1267 A partir de novembre 2015, 3 radars en bande X situés dans les Alpes ont aussi
1268 été ajoutés au réseau. De plus, à partir de 2007, l'utilisation des cumuls horaires
1269 intermédiaires d'ANTILOPE a permis d'améliorer la méthode de production de ces
1270 données, avec une meilleure calibration et prise en compte des pluies convectives, qui
1271 entraîne une diminution de la sous-estimation en zone montagneuse (Roger, 2018).
1272 Ces deux derniers points conduisent à une amélioration de la représentation des
1273 précipitations de COMEPHORE dans le temps, mais peuvent aussi conduire à une
1274 inhomogénéité temporelle qu'il faut considérer lors de son utilisation.

1275 Malgré ces limitations, COMEPHORE est considéré, à ce jour, comme le meilleur pro-
1276 duit de précipitation horaire et kilométrique disponible sur la France et sur une relativement
1277 longue période (plus de 20 ans). Peu de pays dans le monde possèdent ce type de base de
1278 données à haute résolution et c'est donc une réelle opportunité de disposer de ces données
1279 de référence pour l'évaluation des CP-RCMs et en particulier, pour l'étude des épisodes
1280 méditerranéens de l'automne.

1281 **2.1.3 RadissagH sur la Suisse**

1282 RdisagH (Wüest et al, 2010) est un jeu grillé de données de précipitation à haute
1283 résolution (1 km, horaire) sur la Suisse, fusionnant les observations radar et stations. La
1284 méthode est proche de celle utilisée pour COMEPHORE : le produit quotidien est obtenu
1285 en fusionnant les données radar et les pluviomètres, puis est désagrégé au pas de temps
1286 horaire, en utilisant les informations du radar. Fourni par MétéoSuisse, il n'est toutefois
1287 disponible que de mai 2003 à 2010.

1288 **2.1.4 RADKLIM sur l'Allemagne**

1289 RADKLIM (Winterrath et al, 2017) est un jeu grillé de données de précipitation à haute
1290 résolution (1 km, horaire) sur l'Allemagne, fusionnant les observations radar et stations.
1291 L'estimation des précipitations basée sur le radar est ajustée avec les mesures de précipi-
1292 tation effectuées par les pluviomètres. Fourni par le DWD (Deutscher Wetterdienst), il est
1293 disponible entre 2001 et 2020².

1294 **2.1.5 GRIPHO sur l'Italie**

1295 GRIPHO (Fantini, 2019) est un jeu grillé de données de précipitation à haute résolution
1296 (3 km, horaire) sur l'Italie. Ce jeu de données est uniquement basé sur les données des
1297 pluviomètres, avec une plus grande densité de stations dans la partie nord de l'Italie et une
1298 densité moyenne de stations voisine de une pour 9x9 km². L'absence de données radar et la
1299 densité variable des stations peuvent localement limiter la qualité de ces données. Produit
1300 par CETEMPS, University of L'Aquila et l'ICTP, il est disponible de 2001 à 2016.

1301 **2.1.6 EURO4M-APGD sur le domaine pan-alpin**

1302 Pour étendre la zone et la période couverte par des observations lors des analyses au pas
1303 de temps quotidien, la base de données quotidiennes EURO4M-APGD sur le domaine pan-
1304 alpin est également utilisée. EURO4M-APGD (Isotta et al, 2014) est un jeu de données
1305 de précipitation quotidienne avec une résolution de 5 km, s'étendant sur l'ensemble de
1306 la région alpine, fournie par MétéoSuisse et développée dans le cadre du projet européen
1307 EURO4M (European Reanalysis and Observations for Monitoring). Il est disponible de
1308 1971 à 2008. Le jeu de données est basé sur des mesures de précipitation issues d'un réseau
1309 dense de pluviomètres, comprenant plus de 8500 stations en Autriche, Croatie, France,
1310 Allemagne, Italie, Slovénie et Suisse, et prenant en compte les relations locales entre la
1311 topographie et les précipitations à l'échelle climatologique.

1312 **2.1.7 Les limites des jeux de données d'observation**

1313 Certaines limites doivent être prises en compte lorsqu'on utilise des données d'observa-
1314 tion de précipitation :

- 1315 — les erreurs de mesure des pluviomètres, telles que la sous-estimation des précipitations
1316 en cas de vent fort et/ou d'une faible intensité des précipitations ou de chutes de neige
1317 (Neff, 1977; Yang et al, 1999). Cette limitation est particulièrement importante dans
1318 les zones montagneuses.
- 1319 — les erreurs de mesure radar telles que l'effet de masque entraînant une sous-estimation
1320 des précipitations dans les zones à fort relief, une sous-estimation en cas de chutes
1321 de neige ou une surestimation en cas de grêle.

2. RADKLIM est accessible via le site https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/help/landing_pages/doi_landingpage_RADKLIM_RW_V2017.002-en.html

1322 — les erreurs d’interpolation dans les champs de précipitation grillés, en particulier
1323 dans les zones à faible densité de stations et en raison de la forte variabilité spatiale
1324 des précipitations. Ce problème conduit à un champ de précipitation lissé, à une
1325 mauvaise représentation des précipitations convectives extrêmes aux échelles infra-
1326 horaires (Schroeder et al, 2018) et à une sous-estimation systématique des quantiles
1327 élevés (Gervais et al, 2014; Beguería et al, 2016). La fusion des données ponctuelles
1328 issues de pluviomètres et des données radar spatialement continues est une solution
1329 pour limiter ce problème.

1330 Ces différentes limitations conduisent souvent à une résolution effective du jeu de don-
1331 nées plus grossière que la résolution donnée. Cependant, elles ne sont pas susceptibles de
1332 remettre en cause l’évaluation des modèles qui sera présentée au Chapitre 3 tant les diffé-
1333 rences constatées d’un modèle à l’autre sont généralement supérieures aux incertitudes sur
1334 les observations.

1335 **2.2 La chaîne de modélisation du climat au CNRM**

1336 La chaîne de modélisation de descente d’échelle dynamique utilisée pour cette thèse est
1337 la suivante : le GCM CNRM-CM5 à 150 km de résolution ou la réanalyse ERA-Interim (80
1338 km) servent de modèle forceur pour le RCM CNRM-ALADIN (12.5 km) qui, lui-même,
1339 fournit les conditions aux limites au CP-RCM CNRM-AROME à 2.5 km (cf. Figure 2.3).
1340 Il n’est pas encore possible de forcer directement le modèle à haute résolution (2.5 km)
1341 par les données de modèle global (150 km) car le saut de résolution serait trop important
1342 (Laprise et al, 2008; Matte et al, 2016, 2017). Un rapport qui dépasse le rapport de 1 à
1343 12 entre les modèles forceur et forcé est conseillé (Prein et al, 2015). Dans notre cas, une
1344 stratégie de forçage à deux niveaux est donc choisie : l’étape intermédiaire est le RCM
1345 CNRM-ALADIN avec une résolution horizontale de 12.5 km (soit un rapport de 1 à 12
1346 entre le GCM et le RCM et de 1 à 5 entre le RCM et le CP-RCM).

1347 Les modèles CNRM-AROME et CNRM-ALADIN sont décrits dans l’article Caillaud et al
1348 (2021) (Chapitre 3), mais les principaux éléments sont repris dans cette partie.

1349 **2.2.1 La réanalyse globale ERA-Interim**

1350 Une réanalyse météorologique est une méthode visant à obtenir des données clima-
1351 tiques uniformes et homogénéisées sur plusieurs décennies, en se basant sur un maximum
1352 de données observées, de surface et d’altitude et en utilisant un modèle de prévision mé-
1353 téorologique, ainsi que son algorithme d’assimilation des données.

1354 La réanalyse globale ERA-Interim (Dee et al, 2011) est produite par le Centre Européen
1355 pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT). Cette réanalyse est une
1356 réanalyse atmosphérique globale utilisant un système d’assimilation de données observées
1357 basé sur une version de 2006 du modèle européen IFS (Integrated Forecasting System
1358 Cy31r2). Le système comprend une analyse 4D-Var avec une fenêtre d’analyse de 12 heures.
1359 La résolution spatiale de l’ensemble de données est d’environ 80 km (T255 spectrale) sur

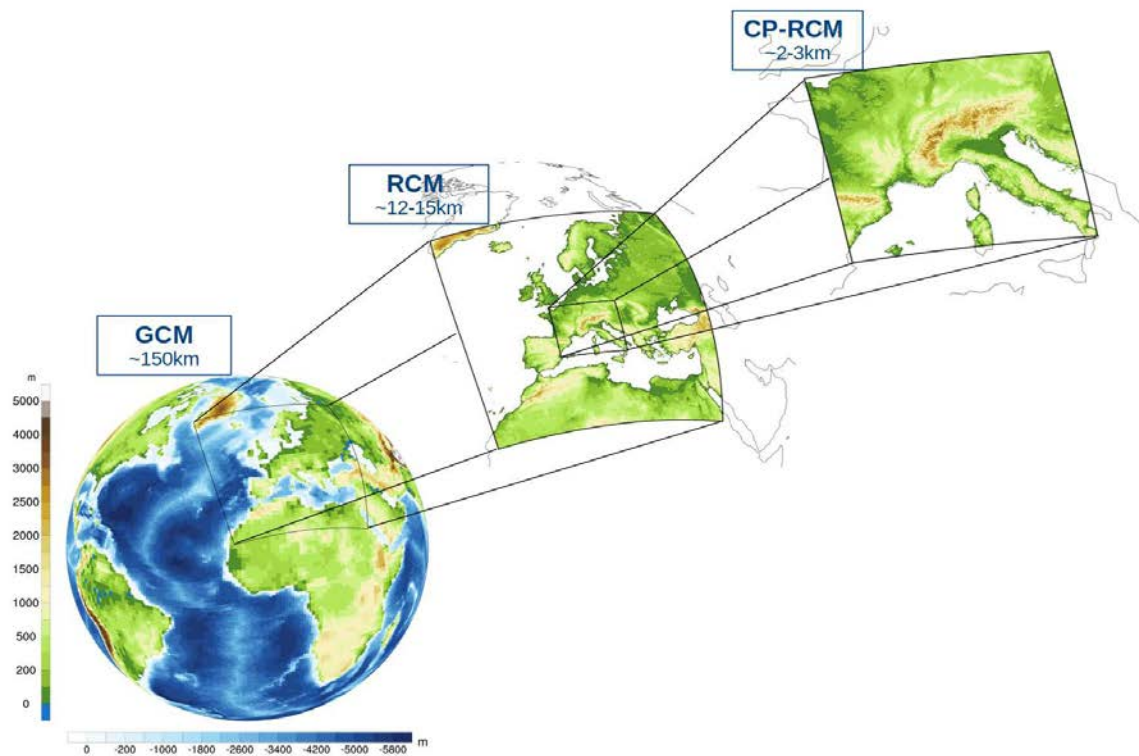


FIGURE 2.3 – La chaîne de modélisation du GCM au CP-RCM, en passant par le RCM

1360 60 niveaux verticaux de la surface jusqu'à 0,1 hPa. Cette réanalyse couvre la période 1979-
 1361 2018.

1362 La nouvelle réanalyse globale ERA5 du CEPMMT avec une résolution plus élevée (en-
 1363 viron 30 km) n'était pas encore disponible lorsque nos simulations ont été réalisées.

1364 En modélisation climatique, ces réanalyses globales sont, en particulier, utilisées pour
 1365 fournir les conditions aux limites aux modèles régionaux de climat pour des simulations
 1366 d'évaluation. Ainsi, la réanalyse ERA-Interim a été utilisée au cours de cette thèse pour
 1367 réaliser les simulations d'évaluation des CP-RCMs.

1368 2.2.2 CNRM-CM5

1369 CNRM-CM5 (Voltaire et al, 2013) est la version 5 du modèle couplé global de circula-
 1370 tion générale ou GCM, développé conjointement par le CNRM et le CERFACS (Centre Eu-
 1371 ropéen de Recherche et de Formation Avancée) afin de contribuer à la phase 5 des exercices
 1372 d'intercomparaison du GIEC, CMIP5. Il comprend le modèle atmosphérique ARPEGE-
 1373 Climat (v5.2), le modèle océanique NEMO (v3.2), le schéma de surface ISBA, le routage
 1374 des fleuves CTRIP et le modèle de glace de mer GELATO (v5) couplés à travers le système
 1375 OASIS (v3). Le schéma de convection profonde utilisé pour ces simulations était encore le
 1376 schéma de flux de masse basé sur une fermeture de convergence d'humidité (Bougeault,
 1377 1985) avec condensation et précipitation qui suivent la règle "tout ce qui condense préci-
 1378 pite". La résolution horizontale est d'environ 150 km dans l'atmosphère avec 31 niveaux
 1379 verticaux et 100 km dans l'océan.

1380 2.2.3 CNRM-ALADIN

1381 CNRM-ALADIN (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational)
1382 est le modèle régional de climat (RCM) utilisé au CNRM depuis le début des années 2000
1383 (Spiridonov et al, 2005; Déqué and Somot, 2008; Radu et al, 2008; Sanchez-Gomez et al,
1384 2009; Colin et al, 2010), basé sur le modèle de PNT ALADIN. Il peut être vu comme une
1385 version à aire limitée du modèle ARPEGE-Climat, partageant la majeure partie du code,
1386 pour la dynamique ou les paramétrisations physiques.

1387 CNRM-ALADIN est un modèle à aire limitée, bi-spectral et hydrostatique avec un
1388 schéma d'advection semi-lagrangien et une discrétisation temporelle semi-implicite, ce qui
1389 permet au modèle une rapidité d'exécution indispensable en PNT, mais également appréciable
1390 pour les longues simulations climatiques. La version 6 de CNRM-ALADIN utilisée
1391 (Nabat et al, 2020) se base sur le cycle 37t1 d'ARPEGE-IFS et sur la version 6 de la
1392 physique climat commune à ARPEGE-Climat v6 ou à CNRM-CM6 utilisé dans CMIP6.
1393 A 12.5 km, ce modèle comprend encore une paramétrisation de la convection profonde.
1394 Les schémas de convection de la v6 sont différents de ceux utilisés par ARPEGE-Climat
1395 v5.2 de CNRM-CM5 : en effet, dans la version 6, un nouveau schéma de convection a
1396 été implémenté, comprenant les convections sèche, peu profonde et profonde (Piriou et al,
1397 2007; Guérémy, 2011). Ce nouveau schéma appelé PCMT (Prognostic Condensates Mi-
1398 crophysics and Transport) permet de représenter la convection avec ou sans condensation,
1399 avec ou sans précipitation avec une nouvelle fermeture en relaxation de CAPE (Convective
1400 Available Potential Energy).

1401 Le détail des paramétrisations physiques de CNRM-ALADINv6 se trouve dans la Table
1402 2.2.

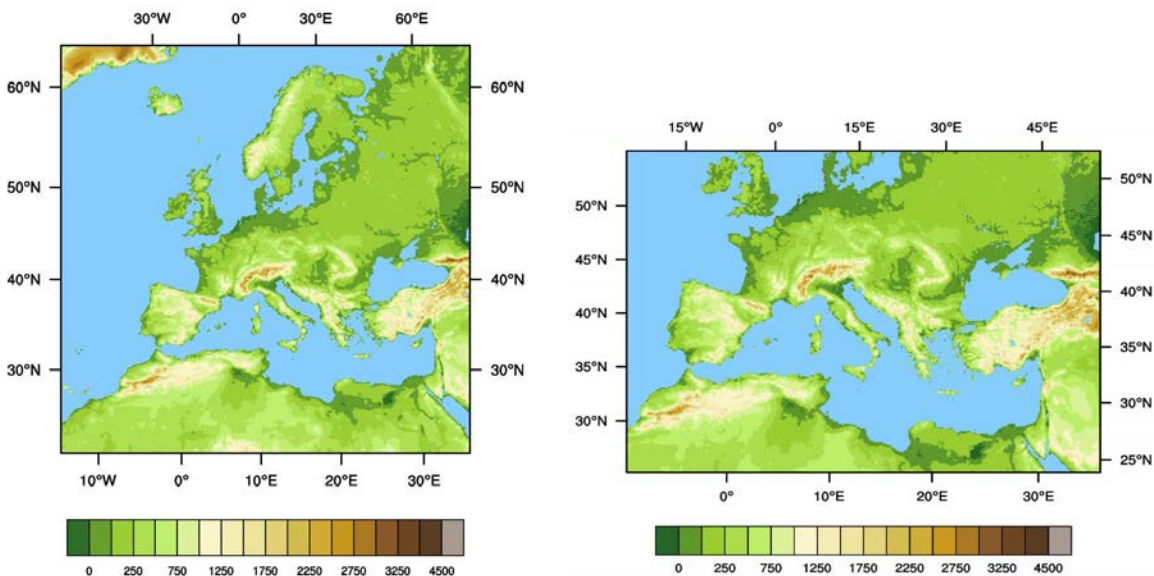


FIGURE 2.4 – Les domaines EURO-CORDEX ($nlat=480$ et $nlon=480$, soit 230 400 points) et Med-CORDEX ($nlat=288$ et $nlon=432$, soit 124 416 points) de CNRM-ALADIN à 12.5 km

1403 La plateforme de modélisation de la surface est la plateforme SURFEX 8³ (Masson et al,
 1404 2013; Le Moigne et al, 2020). Chaque maille du modèle est divisée en quatre types de sur-
 1405 face associés à des paramétrisations différentes indiquées dans la Table 2.3.

1406 Dans toutes nos simulations, CNRM-ALADIN présente une résolution horizontale de
 1407 12.5 km et 91 niveaux verticaux de 10 m à 0.1 hPa. Le pas de temps est de 450 s. Des
 1408 simulations sur les domaines Med-CORDEX et EURO-CORDEX sont utilisées dans cette
 1409 thèse (cf. Figure 2.4).

1410 Une technique de pilotage spectral (von Storch et al, 2000) peut être appliquée à CNRM-
 1411 ALADIN (Radu et al, 2008; Colin et al, 2010; Herrmann et al, 2011) afin d'imposer des
 1412 conditions de grande échelle aussi proches que possible de la réalité lorsque le rappel se fait
 1413 vers des réanalyses (et de conserver la grande échelle du GCM si le rappel est fait vers un
 1414 GCM).

<i>Paramétrisation</i>	<i>CNRM-ALADIN</i>	<i>CNRM-AROME</i>
<i>Turbulence</i>	CBR - Schéma basé sur une équation pronostique de la TKE (Cuxart et al, 2000; Bougeault and Lacarrere, 1989)	
<i>Convection profonde</i>	Schéma PCMT (Piriou et al, 2007; Guérémy, 2011)	/
<i>Convection peu profonde</i>	Schéma PCMT (Piriou et al, 2007; Guérémy, 2011)	Schéma PMMC09 basé sur l'approche EDMF (Pergaud et al, 2009)
<i>Nuages</i>	Schéma statistique de nuages (Bougeault, 1982)	Schéma statistique de nuages (Bechtold et al, 1995)
<i>Microphysique et sédimentation</i>	Schéma de Lopez (Lopez, 2002) avec quatre variables pronostiques d'eau condensée, appelé deux fois, pour la partie grande échelle et pour la partie convective Schéma de sédimentation (Bouteloup et al, 2011)	ICE3, schéma microphysique pronostique à un moment avec cinq variables pronostiques d'eau condensée (goutte d'eau nuageuse, pluie, glace, neige et graupel) La grêle n'est pas activée. (Pinty and Jabouille, 1998; Lascaux et al, 2006) Schéma de sédimentation (Bouteloup et al, 2011)
<i>Rayonnement</i>	Transfert radiatif du CEPMMT RRTMG 16 bandes pour le longwave (Iacono et al, 2008; Mlawer et al, 1997) FMR 6 bandes pour le shortwave (Fouquart and Bonnel, 1980; Morcrette, 2001)	

Tableau 2.2 – Les paramétrisations physiques de CNRM-ALADINv6 et CNRM-AROME41t1

3. <https://www.umr-cnrm.fr/surfex/>

<i>Type de surface</i>	<i>CNRM-ALADIN</i>	<i>CNRM-AROME</i>
Terre	ISBA-Diff, avec 12 patchs, soit 12 types de sol ou de végétation, et 14 couches verticales dans le sol Modèle de neige : ISBA-ES (Decharme et al, 2011)	ISBA-3L, avec un seul patch et 3 couches verticales dans le sol (Noilhan and Planton, 1989) Modèle de neige : D95 (Douville et al, 1995)
Ville	Le modèle de ville n'est pas activé, la ville est traitée comme une surface terrestre couverte de roche	TEB (Town Energy Balance), modèle de ville (Masson, 2000)
Océan (échanges turbulents entre océan et atmosphère)	ECUME6 (Belamari and Pirani, 2007)	COARE3 (Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment) (Fairall et al, 2003)
Lacs et rivières	FLAKE (Mironov et al, 2010)	Formulation de Charnock (Charnock, 1955)

Tableau 2.3 – Les paramétrisations de surface de CNRM-ALADINv6 et CNRM-AROME41t1

1415 2.2.4 CNRM-AROME

1416 CNRM-AROME est le modèle régional de climat à convection profonde résolue (CP-
1417 RCM) utilisé au CNRM depuis 2014. Le modèle CNRM-AROME est basé sur le modèle à
1418 aire limitée, non hydrostatique et résolvant la convection profonde AROME (Applications
1419 de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Echelle) utilisé en PNT à Météo-France depuis
1420 2008 (Seity et al, 2011; Brousseau et al, 2016). Le modèle AROME est également utilisé
1421 en mode climat par le KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut) et la com-
1422 munauté HARMONIE-CLIMAT, qui est constituée du DMI (Danmarks Meteorologiske
1423 Institut), de Met Norway et du SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute)
1424 (Belušić et al, 2020; Lind et al, 2020).

1425 CNRM-AROME est un modèle basé sur le coeur dynamique bi-spectral non-hydrostatique
1426 d'ALADIN (Bénard et al, 2010) avec un schéma d'advection semi-lagrangien et une dis-
1427 crétisation temporelle semi-implicite, ce qui permet également une appréciable rapidité
1428 d'exécution. En raison de la haute résolution et de la dynamique non-hydrostatique, il
1429 n'est plus nécessaire de paramétrer la convection profonde qui est explicitement résolue
1430 par les équations de la dynamique du modèle. Toutefois, la convection peu profonde, qui
1431 demeure sous-maille, nécessite toujours une paramétrisation. A l'exception du schéma de
1432 rayonnement, les paramétrisations physiques proviennent du modèle de recherche Méso-
1433 NH (Lafore et al, 1998; Lac et al, 2018), avec notamment des schémas sophistiqués pour
1434 la microphysique ou les nuages, particulièrement adaptés à la haute résolution.

1435 Les simulations réalisées dans le cadre de cette thèse utilisent le cycle 41t1 (Termonia et al,
1436 2018) qui était utilisé en PNT entre décembre 2015 et décembre 2017. Le détail des para-
1437 métrisations physiques de CNRM-AROME41t1 se trouve dans la Table 2.2.

1438 Le plateforme de modélisation de la surface est la plateforme SURFEX 7.3 (Masson et al,

1439 2013). Chaque maille du modèle est divisée en quatre types de surface associés à des para-
 1440 métrisations différentes indiquées dans la Table 2.3.

1441 Comme la hauteur de la première couche verticale est de 10 mètres, un schéma de couche
 1442 limite CANOPY-SBL (Masson and Seity, 2009) est activé sur terre. Cette paramétrisation
 1443 ajoute des couches atmosphériques pronostiques supplémentaires entre le sol et le niveau
 1444 le plus bas du modèle et permet de calculer explicitement la température à 2 mètres et le
 1445 vent à 10 mètres.

1446 Les données physiographiques de 215 écosystèmes représentant des zones de végétation
 1447 homogènes sont fournies par la base de données mondiale ECOCLIMAP I (Masson et al,
 1448 2003) à une résolution de 1 km. La base de données pour l'orographie est GMTED2010
 1449 avec une résolution de 250 m (Carabajal et al, 2011).

1450 Dans toutes nos simulations, CNRM-AROME présente une résolution horizontale de
 1451 2.5 km, ce qui était la résolution du modèle AROME en PNT jusqu'en 2015. Le nombre de
 1452 niveaux verticaux est de 60, allant de 10 m à environ 1 hPa, avec 21 niveaux en dessous de
 1453 2000 m, ce qui permet d'obtenir une bonne description des basses couches de l'atmosphère
 1454 (cf. Figure 2.5). Le pas de temps est de 60 s.

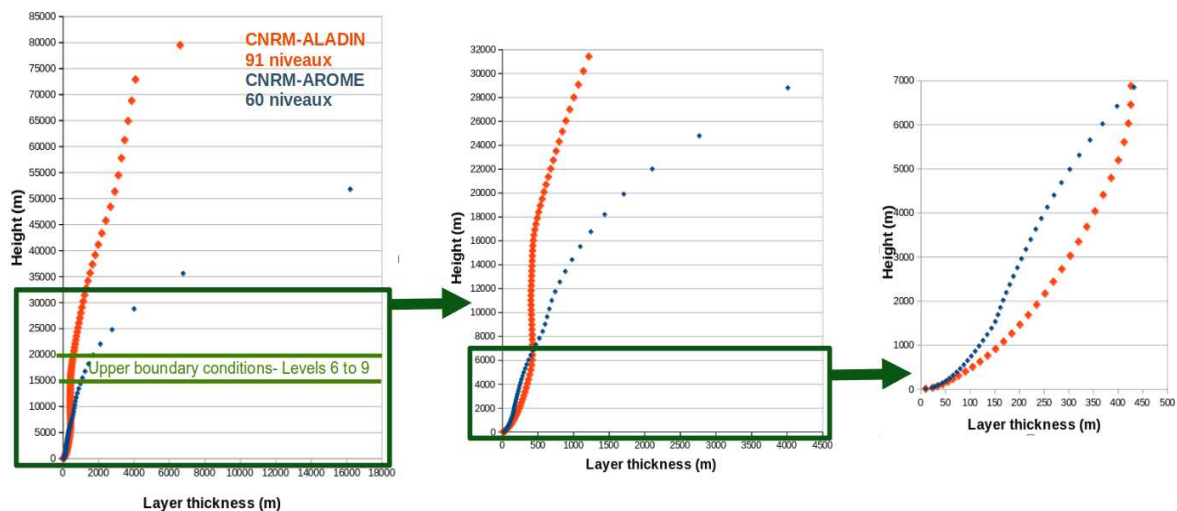


FIGURE 2.5 – Les niveaux verticaux de CNRM-AROME et de CNRM-ALADIN avec un zoom sur les 32 premiers kilomètres, puis sur les 7 kilomètres les plus proches du sol

1455 La figure 2.6 résume les principales caractéristiques de CNRM-AROME41t1.

1456 **Résolution effective**

1457 La résolution effective d'un modèle est la résolution à partir de laquelle les processus à
 1458 plus petite échelle ne sont pas représentés de manière adéquate par le modèle. Elle diffère
 1459 de la résolution de la grille sur laquelle tourne le modèle (Δx), appelée résolution nominale
 1460 et ici égale à 2.5 km. Une étude de Ricard et al (2013) basée sur l'analyse spectrale de
 1461 l'énergie cinétique (Skamarock, 2004) a montré que la résolution effective d'AROME pour
 1462 un Δx de 2.5 km est d'environ 9-10 Δx et que la plus petite longueur d'onde représentée
 1463 dans le modèle est de 5 km, soit deux fois Δx . Le schéma numérique semi-implicite semi-
 1464 lagrangien, choisi pour permettre une grande rapidité d'exécution, limite la capacité de

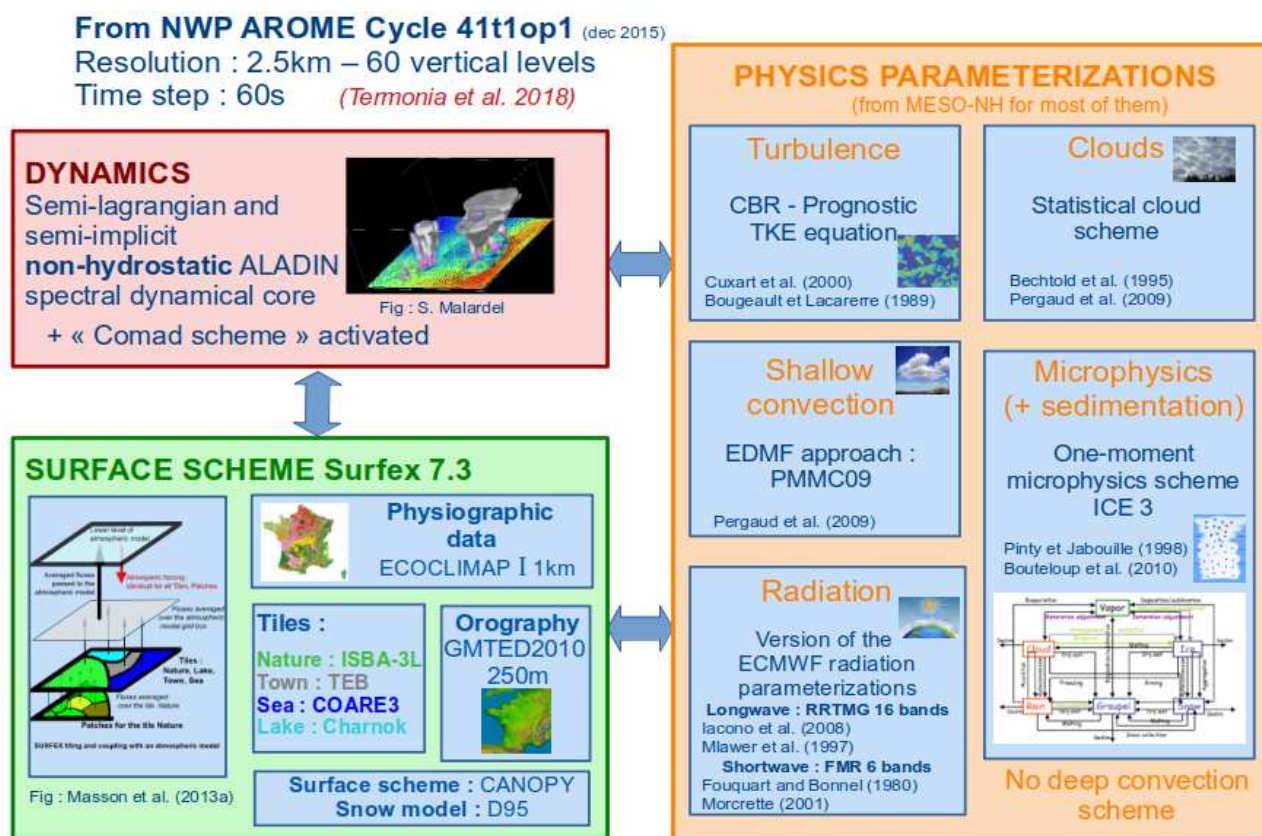


FIGURE 2.6 – Le modèle CNRM-AROME41t1 : dynamique, paramétrisations physiques et plateforme de modélisation de la surface

1465 résolution du modèle et empêche certains phénomènes de petite échelle d'être correctement
 1466 représentés. Toutefois, les systèmes convectifs impliqués dans les épisodes méditerranéens
 1467 présentent des tailles suffisamment grandes et devraient donc être correctement représentés
 1468 par CNRM-AROME, ce que nous vérifierons dans le chapitre suivant.

1469 **Le passage du cycle 38 au cycle 41**

1470 Les premières simulations climatiques avec AROME au CNRM ont été réalisées par
 1471 Michel Déqué et Antoinette Alias dès 2014 sur un domaine sud-est de la France (SUDE)
 1472 (cf. Figure 2.7), avec la version 38t1 et déjà une résolution de 2.5 km. Les premières
 1473 études ont porté sur la valeur ajoutée d'AROME pour la représentation des précipitations
 1474 extrêmes à l'automne (Fumière et al, 2020) et sur la réponse future de ces événements au
 1475 changement climatique (Déqué et al, 2016).

1476 A partir de 2018, les simulations suivantes réalisées dans le cadre de la thèse de Quentin
 1477 Fumière (Fumière, 2019) et également pour cette thèse sont basées sur le cycle 41t1. Toutes
 1478 les simulations réalisées dans le cadre du programme CORDEX-FPS Convection et du
 1479 projet EUCP (cf. Section 1.3.5) utilisent également cette version de CNRM-AROME. Trois
 1480 modifications importantes ont été faites par rapport aux simulations précédentes :

- 1481 • une nouvelle base de données pour l'orographie à plus haute résolution est utilisée :
- 1482 GTOPO30 avec une résolution de 1 km (Survey, 1993) est remplacé par GMTED2010
- 1483 avec une résolution de 250 m (Carabajal et al, 2011) ;

1484 • la correction COMAD (Malardel and Ricard, 2015) a été ajoutée afin de limiter les
1485 surestimations de précipitation et les vents irréalistes qui apparaissaient sous certaines
1486 conditions au voisinage des nuages convectifs ;

1487 • la paramétrisation des flux air-mer par ECUME, dont la version comprenait des
1488 erreurs problématiques en climat, est remplacée par le schéma COARE3.

1489 Fumière (2019) a comparé les deux versions du modèle (cycles 38 et 41) et a montré
1490 une amélioration de la représentation des précipitations de l'automne sur le sud-est de la
1491 France avec CNRM-AROME41t1.

1492 **Comparaison avec AROME PNT**

1493 Pour ces premières simulations climatiques avec AROME, le choix a été fait de se
1494 rapprocher au maximum de la version AROME utilisée en PNT pour bénéficier de leur ex-
1495 périence. Actuellement, les principales différences entre AROME utilisé en PNT et CNRM-
1496 AROME utilisé en climat sont :

1497 • les résolutions horizontale et verticale : depuis 2015, la résolution a augmenté en
1498 PNT, avec la passage à 1.3 km et 90 niveaux verticaux ;

1499 • l'activation de CANOPY, inutile en PNT puisque le premier niveau vertical est main-
1500 tenant à 5 m ;

1501 • la paramétrisation des flux air-mer (la PNT avait conservé le schéma ECUME, mais
1502 elle est passée à la nouvelle version corrigée ECUME6 récemment) ;

1503 • la zone de relaxation où sont imposées les conditions latérales est étendue de 8 à 21
1504 points de grille pour éviter de perdre les informations du modèle forceur en entrée du
1505 domaine du CP-RCM, même si la fréquence de forçage de une heure est conservée.

1506 **Domaines et autres applications de CNRM-AROME**

1507 Le domaine utilisé dans cette thèse est le domaine pan-alpin commun défini dans le
1508 cadre du FPS Convection (ALP-3), choisi pour bien représenter les épisodes méditerranéens
1509 du nord-ouest de la Méditerranée et donc particulièrement adapté à notre étude. D'autres
1510 domaines ont été définis pour les études avec CNRM-AROME dont le domaine Nord-Ouest
1511 de l'Europe (NWE-3), presque deux fois plus grand que ALP-3, ou le domaine REU-3 centré
1512 sur l'île de la Réunion, tous deux définis dans le cadre du projet européen EUCP (cf. Figure
1513 2.7).

1514 Si cette thèse se concentre sur l'étude des pluies extrêmes méditerranéennes, d'autres
1515 études, auxquelles j'ai pu participer, ont été réalisées ou sont en cours et utilisent les
1516 simulations du CP-RCM CNRM-AROME :

1517 • la contribution à plusieurs études d'inter-comparaison multi-modèle de CP-RCMs
1518 dans le cadre du programme FPS convection ou du projet européen EUCP (pré-
1519 cipitations : Ban et al (2021); Pichelli et al (2021); Ha et al (2022), températures :
1520 Soares et al (2022), tempêtes hivernales : Berthou et al (2022), vent : Molina et al
1521 (2023));

1522 • une évaluation plus générale de CNRM-AROME sur le domaine NWE-3 (Lucas-Picher et al,
1523 2023);

- 1524 • les interactions entre le climat et la ville à l'échelle régionale et locale (Michau et al,
1525 2023a,b; Lemonsu et al, 2023), une collaboration avec CNRM/GMME/VILLE ;
- 1526 • le climat de montagne, dans les Alpes avec la thèse de Diego Monteiro (CNRM/CEN)
1527 (Monteiro et al, 2022) ;
- 1528 • le climat des îles : La Réunion (E. Brisson, M.D. Leroux, non publié), la Corse avec la
1529 thèse d'Edith Cortes-Hernandez (CNRM/GMGEC/ MOSCA) (Cortés Hernandez et al,
1530 2023), la Polynésie française avec la thèse d'Amarys Casnin (CNRM/GMGEC/ATMO) ;
- 1531 • les impacts du changement climatique sur les crues en France avec la thèse de Nils
1532 Poncet (CNRM/GMGEC/MOSCA).

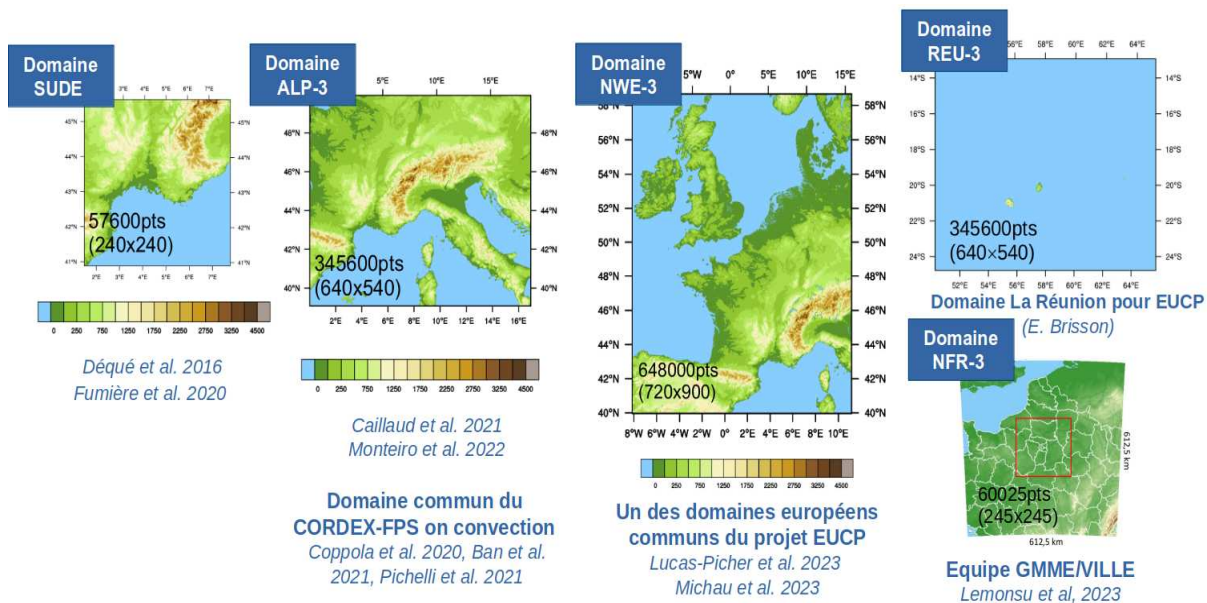


FIGURE 2.7 – Les différents domaines de CNRM-AROME à 2.5 km

1533 Comparaison entre CNRM-AROME et CNRM-ALADIN

1534 Si CNRM-AROME présente une meilleure résolution horizontale, une dynamique non-
1535 hydrostatique et des paramétrisations physiques plus sophistiquées et adaptées à la haute
1536 résolution, CNRM-ALADIN a un nombre de niveaux verticaux plus grand. Toutefois, la ré-
1537 partition des niveaux verticaux entre les deux modèles (cf. Figure 2.5) est assez différente :
1538 contrairement à CNRM-ALADIN, il y a peu de niveaux verticaux dans la haute tropo-
1539 sphère et la stratosphère avec CNRM-AROME et un toit du modèle plus bas. A l'opposé,
1540 on trouve davantage de niveaux verticaux avec CNRM-AROME dans la basse troposphère,
1541 en raison d'un intérêt plus grand dans les basses couches pour un modèle de méso-échelle
1542 tel que CNRM-AROME. D'ailleurs, lors du passage de 60 à 90 niveaux en PNT, la distri-
1543 bution des niveaux verticaux n'a pas beaucoup changé en altitude et c'est surtout dans les
1544 basses couches que le nombre de niveaux a augmenté, avec notamment un premier niveau
1545 abaissé à 5 m. Une autre différence entre CNRM-AROME et CNRM-ALADIN se trouve
1546 dans le choix des paramétrisations de surface : excepté sur la ville qui se limite à une
1547 surface couverte de roche et sur l'océan où COARE3 et ECUME6 peuvent être considérés

1548 comme équivalents pour des vents inférieurs à 30 m/s (Bouin et al, 2023), CNRM-ALADIN
 1549 propose des paramétrisations de la surface plus avancées que CNRM-AROME, bénéficiant
 1550 de l'expérience des modèles de climat du CNRM. Pour les simulations utilisées dans cette
 1551 thèse, les paramétrisations de CNRM-AROME étaient encore celles, plus simples, de la
 1552 PNT où les besoins sont un peu différents, notamment en raison de l'assimilation de don-
 1553 nées observées. Elles seront amenées à évoluer dans les prochaines versions du modèle.
 1554 Cette limite de représentation de la surface par le modèle CNRM-AROME pourrait être
 1555 discutable si la thèse se focalisait sur les épisodes de sécheresse ou les ressources en eau,
 1556 mais semble ici moins problématique puisque les épisodes méditerranéens sont principa-
 1557 lement pilotés par les conditions météorologiques de grande échelle et l'alimentation en
 1558 humidité venant principalement de la mer Méditerranée et de l'Atlantique.

1559 2.2.5 Protocole d'une simulation climatique avec CNRM-AROME

1560 Pour réaliser une simulation avec le modèle régional de climat à aire limitée, CNRM-
 1561 AROME (cf. Figure 2.8), les différentes étapes à suivre (adaptées du cours de modélisation
 1562 régionale du climat de S. Somot⁴) sont les suivantes :

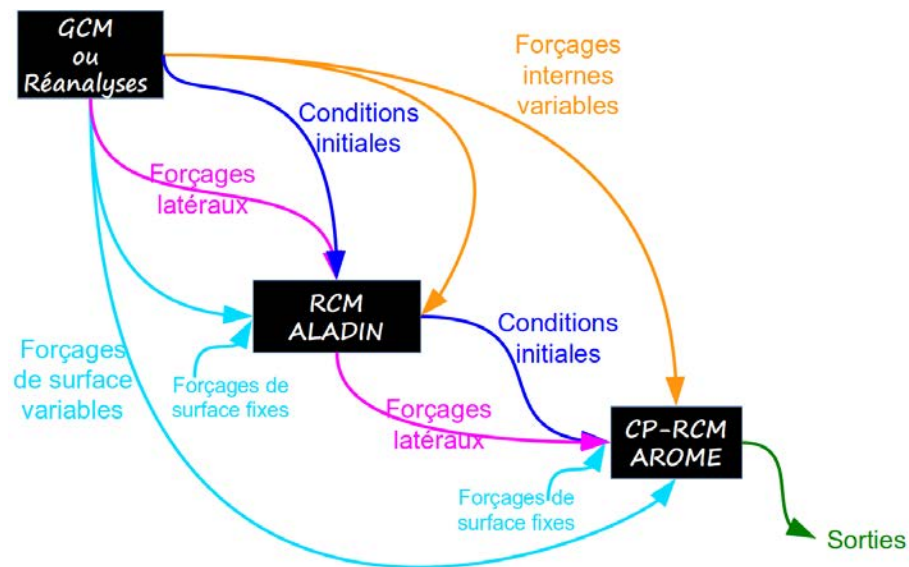


FIGURE 2.8 – Les différents éléments pour réaliser une simulation climatique régionale avec CNRM-AROME (adapté du cours de modélisation régionale du climat de S. Somot)

1563 1. Préparer le modèle

1564 Il s'agit ici de définir le choix du binaire (ici le cycle 41t1op1 d'ARPEGE-IFS), les
 1565 caractéristiques de la dynamique, les schémas de surface et autres caractéristiques
 1566 des paramétrisations physiques, notamment par l'activation de clés dans les namelists
 1567 atmosphérique et surface. Le choix des champs en sortie se fait également dans ces
 1568 deux namelists, ainsi que la fréquence des sorties (horaire) qui est, pour l'instant, la
 1569 même pour tous les champs.

4. doi :10.5281/zenodo.4586910

1570 **2. Préparer la grille de calcul**

1571 Le domaine de simulation de notre modèle à aire limitée est défini, associé à une
1572 grille, une projection et une résolution. Pour CNRM-AROME, la projection utilisée
1573 est Lambert-Conformal. Si l'on cherche à produire des données sur une zone, appelée
1574 zone utile ou centrale et notée C, il faut également ajouter une zone intermédiaire,
1575 notée I ou zone de relaxation ou de couplage, où les conditions aux limites latérales
1576 sont imposées par relaxation. Cette zone comprend 21 points de grille de chaque côté
1577 du domaine. Pour assurer la continuité des champs spectraux et constituer un modèle
1578 torique, il est encore nécessaire d'ajouter une zone d'extension, notée E, comprenant
1579 11 points au nord et à l'est du domaine, zone où des extensions périodiques artificielles
1580 sont ajoutées aux champs (cf. Figure 2.9).

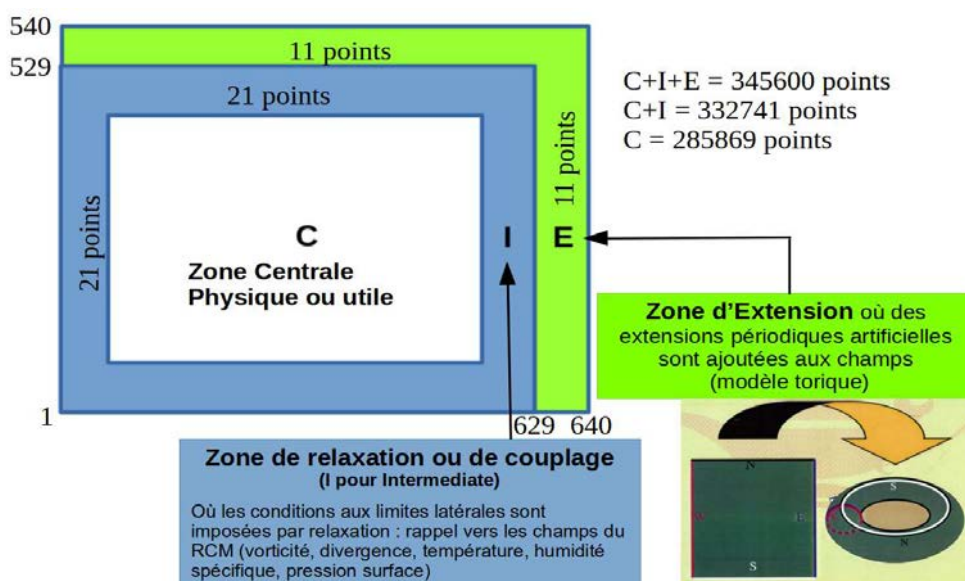


FIGURE 2.9 – La grille d'un modèle spectral à aire limitée avec les zones centrale (C), intermédiaire (I) et d'extension (E), ainsi que le nombre de points de grille pour le domaine ALP-3

1581 **3. Préparer les forçages de surface fixes**

1582 Les fichiers surfex PGD (Physiographic Ground Data) et les fichiers atmosphériques
1583 de climatologie mensuelle (appelées "fichiers clim") doivent être créés sur la grille CIE
1584 du modèle, notamment à partir des bases de données GMTED2010 et ECOCLIMAP
1585 I, et contiennent des informations sur le masque terre-mer, la topographie, le type
1586 d'occupation du sol, sa composition et leur possible évolution mensuelle...

1587 **4. Préparer les forçages internes variables**

1588 Il s'agit ici de préparer des fichiers de forçage pour :

- 1589 • les concentrations des gaz à effet de serre (constantes spatialement et variant
1590 annuellement) : CO₂, CH₄, N₂O, CFC-11, CFC-12, fournies par un fichier texte ;
- 1591 • l'ensoleillement : constante solaire et cycle à 11 ans, fournis par un fichier texte ;
- 1592 • l'ozone (climatologie mensuelle 3D) ;

- 1593 • les AODs (Aerosol Optical Depths) des aérosols avec 5 classes (carbones suies,
1594 organiques, sels marins, poussières désertiques, sulfates) sous forme de champs
1595 mensuels 2D interpolés sur la grille CIE du modèle à partir des données du
1596 modèle forceur ou de climatologies, avec une évolution temporelle pour certains ;
- 1597 • les AODs volcaniques venant du modèle forceur ou de climatologies, interpolés
1598 sur la grille CIE.

1599 5. Préparer les forçages de surface variables

1600 Les données mensuelles de température de surface de la mer (SST) venant du modèle
1601 forceur sont interpolées sur la grille CIE du modèle. Elles sont ensuite interpolées
1602 au pas de temps quotidien en prenant en compte les SSTs des mois précédent et
1603 suivant. Les domaines que couvrent CNRM-AROME actuellement ne nécessitent pas
1604 la création de fichiers de couverture de glace de mer (Sea Ice Cover, SIC).

1605 6. Préparer les forçages latéraux

1606 Il s'agit ici de créer les fichiers de conditions aux limites latérales (Lateral Boundary
1607 Conditions, LBCs) qui seront imposées par relaxation dans la zone intermédiaire I.
1608 Les données de certaines variables pronostiques (vorticité, divergence, température,
1609 humidité spécifique, pression surface) du modèle forceur (ici, CNRM-ALADIN) sont
1610 interpolées sur la grille CIE du modèle, en trois dimensions et toutes les heures,
1611 puisque la fréquence de forçage choisie entre CNRM-AROME et CNRM-ALADIN
1612 est horaire. Cette étape est particulièrement coûteuse.

1613 Pour AROME PNT, des conditions aux limites supérieures sont ajoutées entre 15 et
1614 20 km pour éviter des problèmes de stabilité numérique liés à un faible nombre de
1615 niveaux verticaux dans la haute troposphère et la stratosphère. Elles peuvent être
1616 considérées comme un faible pilotage spectral appliqué avec de faibles coefficients et
1617 seulement pour les longues ondes. Ces conditions aux limites supérieures mises en
1618 place en PNT ont été conservées pour les simulations de CNRM-AROME en climat.

1619 7. Préparer les conditions initiales

1620 Pour l'atmosphère, il s'agit des variables pronostiques du modèle atmosphérique en
1621 trois dimensions à l'instant choisi pour démarrer la simulation sur l'ensemble du
1622 domaine de CNRM-AROME. Dans les faits, on peut donc utiliser le fichier de LBC
1623 à la date de lancement du modèle.

1624 Pour la surface, les données sont initialisées à partir des données de surface de CNRM-
1625 ALADIN. Des valeurs par défaut pour le contenu en eau et la température sont
1626 appliquées pour les trois couches du sol.

1627 8. Réaliser le spin-up de la simulation

1628 Alors qu'en PNT, un état initial et donc des conditions initiales les plus proches pos-
1629 sibles des observations sont primordiales pour effectuer une bonne prévision, ce n'est
1630 pas le cas en climat où l'état initial est rapidement oublié. Les fichiers de conditions
1631 initiales importent donc peu et ce sont les conditions latérales qui jouent par la suite
1632 un rôle majeur pour simuler le climat. Avant de pouvoir analyser les sorties du mo-
1633 dèle, il convient d'attendre un certain temps pour permettre au modèle d'atteindre
1634 son équilibre : ce temps est appelé spin-up temporel. Il dépend de la composante

1635 étudiée. Très long pour l’océan (quelques milliers d’années), le spin-up est court pour
 1636 l’atmosphère, compris entre quinze jours et un mois. Pour la surface, 2 à 3 ans sont
 1637 nécessaires pour un schéma de sol simple comme celui utilisé dans CNRM-AROME.
 1638 Pour chacune des simulations de CNRM-AROME, un spin-up de 2 à 3 ans a été
 1639 réalisé.

1640 9. Réaliser la simulation climatique

1641 Une fois que tous les éléments nécessaires au lancement du modèle sont préparés, la
 1642 simulation est prête à être lancée. On ne réalise pas une simulation en une seule fois,
 1643 mais le lancement se fait par mois pour CNRM-AROME (cf. Figure 2.10) : à la fin du
 1644 premier mois, la simulation s’arrête et les conditions pour l’atmosphère et la surface
 1645 de la dernière échéance du mois sont conservées dans des fichiers appelés "restarts"
 1646 qui serviront de conditions initiales pour le mois suivant. Les données de SSTs, des
 1647 AODs d’aérosols et volcaniques sont également actualisées.

1648 Le schéma 2.11 résume les éléments nécessaires pour effectuer une simulation clima-
 1649 tique avec CNRM-AROME.

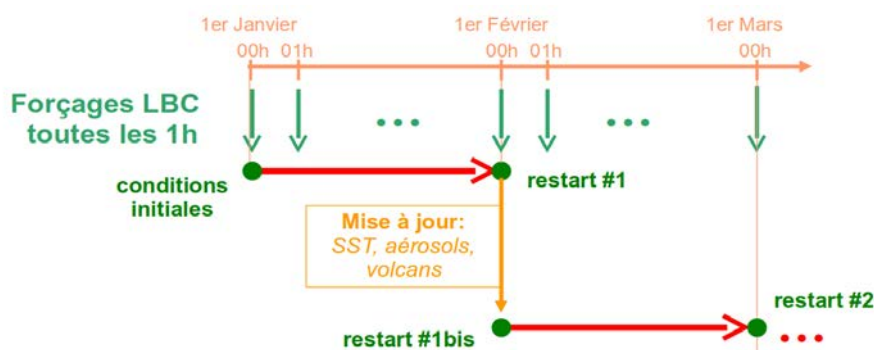


FIGURE 2.10 – Zoom sur les deux premiers mois d’une simulation avec CNRM-AROME (adapté du cours de modélisation régionale du climat de S. Somot)

1650 A la fin de chaque mois, un post-traitement est également effectué sur les champs
 1651 choisis en sortie : les champs qui étaient tous regroupés à la sortie du modèle dans
 1652 un seul fichier pour l’atmosphère et un fichier pour la surface, au format ARPEGE,
 1653 sont placés dans des fichiers séparés par variable, au format binaire. Enfin, à la fin
 1654 de chaque année, un dernier post-traitement (réalisé à l’aide de l’outil POSTALD)
 1655 transforme ces fichiers au format netcdf.

1656 L’outil de post-traitement XIOS (Meurdesoif, 2018) utilisé pour CNRM-CM5 ou
 1657 CNRM-ALADIN et qui permet une plus grande souplesse dans le choix des variables
 1658 en sortie, en récupérant chaque champ directement là où ils sont produits, n’est pas
 1659 encore disponible pour CNRM-AROME.

1660 Des explosions numériques du modèle peuvent survenir de manière exceptionnelle
 1661 (environ une fois tous les 2.5 ans de simulation, pour la simulation d’évaluation par
 1662 exemple), souvent dues à des valeurs de vent anormalement fortes. Plusieurs solutions
 1663 sont à notre disposition : la première est d’augmenter la diffusion horizontale (clé
 1664 RRDXTAU) pour le mois où le problème est apparu. Dans les rares cas où cela ne

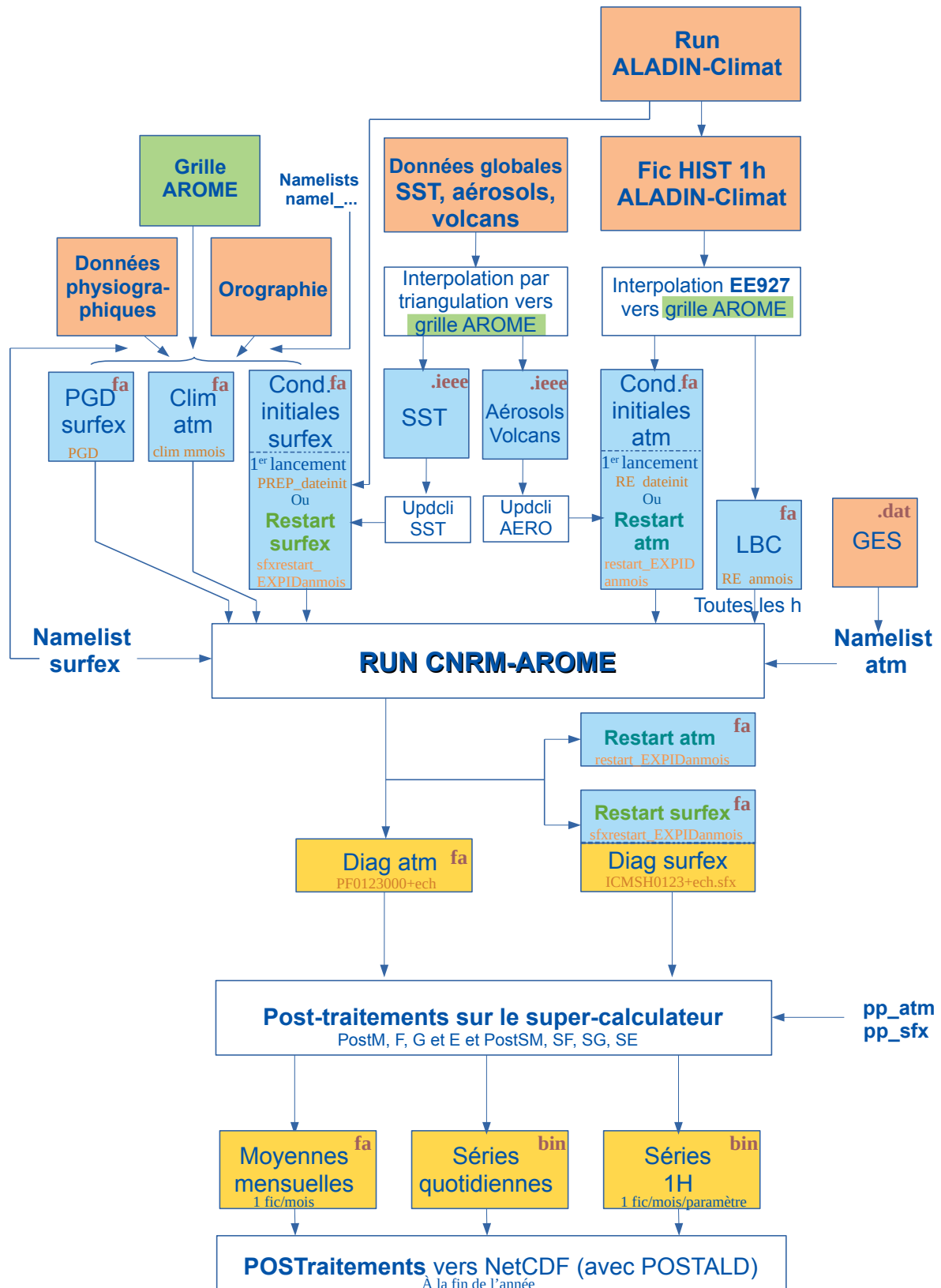


FIGURE 2.11 – Schéma d’une simulation climatique avec CNRM-AROME

1665 suffit pas, deux autres solutions sont envisageables : passer en mode hydrostatique
1666 ou augmenter le pas de temps pour le mois où l'explosion a eu lieu.

1667 Sur le super-calculateur de Météo-France (beaufix) opérationnel lors de la réalisation
1668 des simulations, 5 jours étaient nécessaires pour réaliser une simulation d'un an avec
1669 CNRM-AROME à 2.5 km sur le domaine pan-alpin (soit 142 kh TEI = nombre de
1670 cores \times nombre d'heures par année simulée), ce qui est 16 fois plus long que pour
1671 une simulation CNRM-ALADIN à 12.5 km sur le domaine Med-CORDEX. La taille
1672 d'un fichier de sortie pour une variable et pour un an à la fréquence horaire sur le
1673 domaine ALP-3 est de 6 Go.

1674 Lors de la réalisation des simulations, la cohérence entre les modèles forceurs et forcés
1675 est recherchée, en conservant autant que possible des choix identiques dans les forçages des
1676 différentes simulations.

1677 **2.3 Les simulations climatiques avec CNRM-AROME** 1678 **pour l'étude des épisodes méditerranéens**

1679 Plusieurs type de simulations peuvent être réalisées avec un modèle de climat régional
1680 à aire limitée :

- 1681 • des simulations d'évaluation (ou "hindcast") : le modèle régional est forcé au bord et
1682 en surface de son domaine par des réanalyses (cf. Section 2.2.1) qui constituent la
1683 meilleure estimation de la réalité passée à l'échelle globale. La comparaison directe
1684 de ces simulations aux observations permet de mettre en évidence les bons compor-
1685 tements, ainsi que les biais du modèle. Si le domaine est suffisamment petit ou si
1686 le pilotage spectral est activé, il sera même possible de comparer la chronologie des
1687 événements précipitants ;
- 1688 • des simulations en climat présent (ou "historique") : le modèle régional est forcé par un
1689 GCM forcé par des concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols représentatives
1690 du climat présent. La comparaison avec les observations pourra également être faite
1691 pour évaluer la capacité du modèle à représenter le climat présent, mais il ne sera
1692 pas possible de rechercher la cohérence temporelle avec des événements observés et
1693 l'origine des biais sera plus difficile à identifier, une partie pouvant venir du GCM ;
- 1694 • des simulations en climat futur (ou "scénario") : le modèle régional est forcé par un
1695 GCM forcé par un scénario d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre et
1696 d'aérosols. Par comparaison avec les simulations historiques, il sera possible d'indiquer
1697 les changements projetés suivant le scénario et la période temporelle choisis.

1698 Comme cela est rappelé dans la section précédente, le modèle CNRM-ALADIN est
1699 utilisé comme étape intermédiaire pour éviter un saut de résolution trop grand entre les
1700 réanalyses ou le GCM et le CP-RCM CNRM-AROME.

1701 Le coût de ces simulations de climat à haute résolution a imposé des choix pour la durée
1702 des simulations : si des périodes communes de 10 ans ont été définies dans le protocole du
1703 FPS Convection, il a été tout de même possible, avec CNRM-AROME, grâce à la puissance

1704 et au temps de calcul disponibles à Météo-France, de réaliser une longue simulation d'éva-
 1705 luation de 38 ans, puis des simulations de 20 ans pour chacune des périodes historique,
 1706 scénario milieu de siècle et scénario fin de siècle sur le domaine pan-alpin ALP-3 (cf. Figure
 1707 2.12). Comme les périodes communes de 10 ans ont été faites en priorité, plusieurs simu-
 1708 lations plus longues (évaluation, historique et fin de siècle) ont été faites en deux tranches
 1709 temporelles avec des périodes de spin-up de 2 à 3 ans. Grâce à cette stratégie de spin-up
 1710 et au fait que la continuité est assurée par le forçage latéral de CNRM-ALADIN, nous
 1711 pouvons considérer que les ruptures sont très limitées.

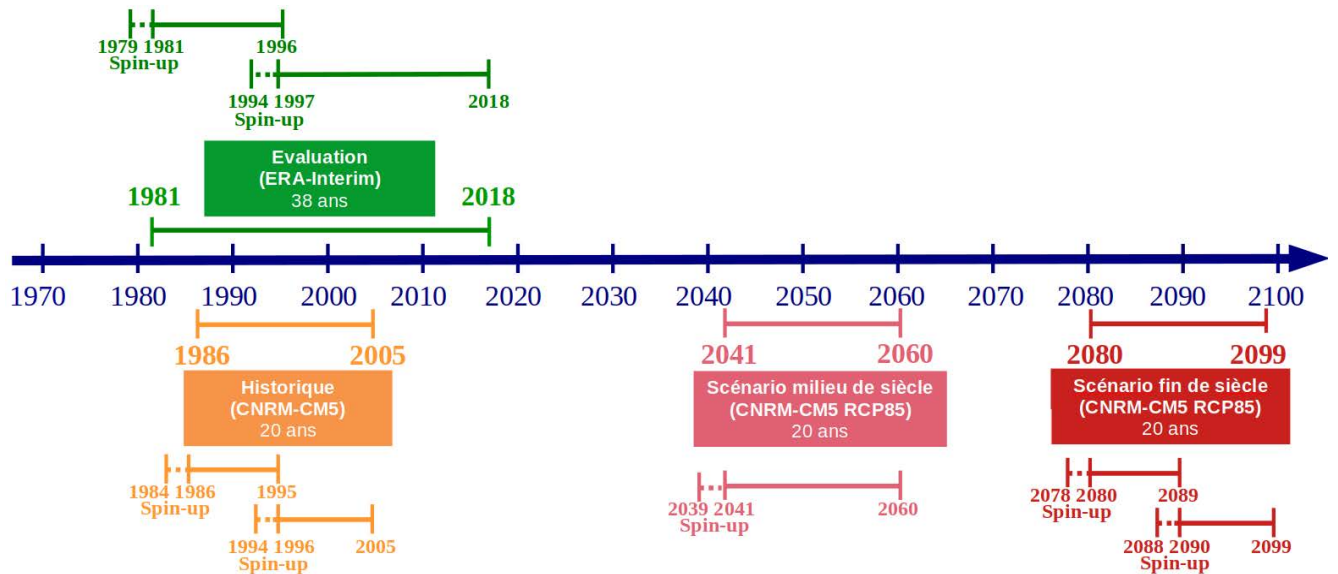


FIGURE 2.12 – Les périodes des différentes simulations de CNRM-AROME sur le domaine ALP-3

1712 2.3.1 La simulation d'évaluation

1713 J'ai réalisé une longue simulation d'évaluation de CNRM-AROME (cf. Figure 2.13),
 1714 c'est-à-dire forcée par des réanalyses atmosphériques, pour la période 1981-2018 (38 ans).
 1715 À ma connaissance, cette simulation d'évaluation est la plus longue jamais réalisée avec
 1716 un CP-RCM, ce qui constitue un avantage pour étudier les extrêmes et leur variabilité
 1717 interannuelle. Les détails de cette simulation et de la simulation de CNRM-ALADIN qui
 1718 la force et qui avait été réalisée par Antoinette Alias sont présentés dans la Table 2.4.

1719 Afin d'obtenir des conditions de grande échelle les plus proches possibles de celles
 1720 observées, la simulation CNRM-ALADIN a utilisé l'option de pilotage spectral, ce qui
 1721 permet une meilleure correspondance avec les observations, notamment au niveau temporel,
 1722 lors de l'analyse des simulations (Coppola et al, 2020).

1723 Si la cohérence a été privilégiée dans les choix des forçages, les sulfates n'ont pas été
 1724 pris en compte dans cette simulation, en raison d'une erreur dans la préparation de la
 1725 simulation (les espèces d'aérosols n'étaient pas regroupés de la même manière en climat et
 1726 en PNT). De plus, les propriétés optiques des aérosols n'ont pas été mises à jour comme

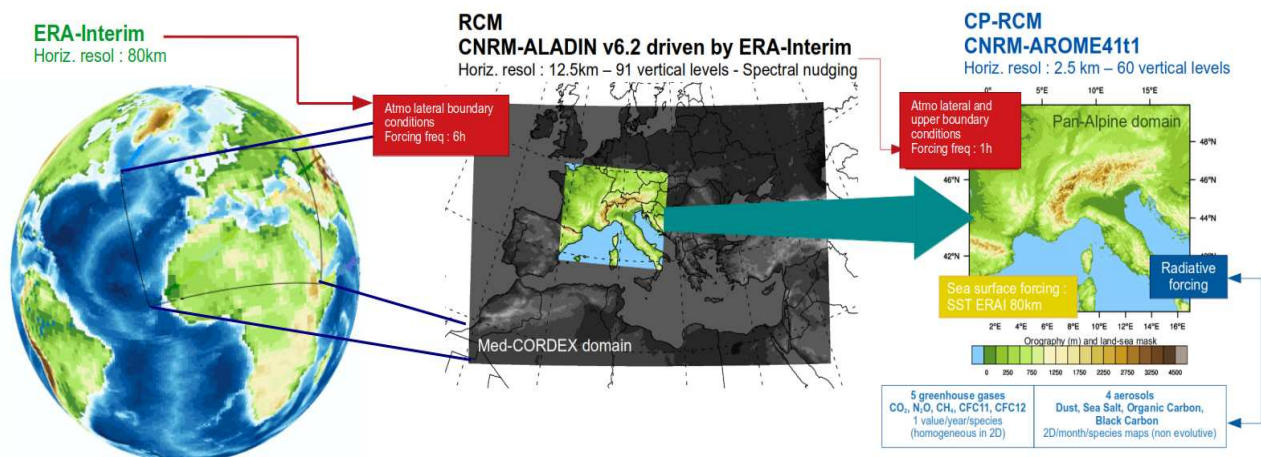


FIGURE 2.13 – Protocole de la simulation d'évaluation pour le CP-RCM CNRM-AROME sur le domaine ALP-3

1727 préconisé dans le Tableau 6 de Nabat et al (2013). Ces erreurs ont été corrigées dans les
 1728 autres simulations.

1729 Une autre erreur a été trouvée très récemment et concerne les valeurs annuelles de gaz
 1730 à effet de serre prises en compte par le modèle. En effet, les concentrations de gaz à effet de
 1731 serre devraient être celles observées avant 2005 et celles du scénario RCP4.5 après, comme
 1732 pour CNRM-ALADIN (suivant les préconisations de CMIP5). Ce ne sont pas exactement
 1733 ces valeurs qui ont été prises à l'intérieur du domaine du CP-RCM, à la suite d'une erreur
 1734 de clé dans la namelist atmosphérique : ce sont les valeurs observées avant 2000, puis celles
 1735 du scénario A1B (utilisé pour CMIP3). Néanmoins, nous considérons que l'effet de cette
 1736 erreur doit être faible car les valeurs prises en compte par le modèle forceur sont correctes
 1737 et il est très probable que le forçage latéral soit l'effet prédominant. De plus, les différences
 1738 entre les valeurs sont très faibles, comme le montre la Figure 2.14 pour les concentrations
 1739 de CO₂.

Caractéristiques	CNRM-ALADIN Evaluation	CNRM-AROME Evaluation (Caillaud et al, 2021)	
Résolution horizontale	12.5 km	2.5 km	
Nb niveaux verticaux	91	60	
Pas de temps	450 s	60 s	
Version du modèle	v6 (Nabat et al, 2020)	Cycle 41t1op1 (Termonia et al, 2018)	
Nom de la simulation	MAD12-1.90a	FIPS25-1.00a	FIPS25-1.00
Période	1979-2018	1981-1996	1997-2018
Spin-up	40 ans	1979-1980	1994-1996
Domaine	Med-CORDEX	ALP-3	
Forçage latéral (LBC)	ERA-Interim	MAD12-1.90a	
Fréquence de forçage	6 h	1 h	
Zone de couplage	8 points	21 points	
Pilotage Spectral	Oui	Non	
SSTs	SSTs mensuelles d'ERA-Interim	SSTs mensuelles d'ERA-Interim	
Aérosols	AODs (Nabat et al, 2013) carbones suies, organiques, sels marins, poussières désertiques : mensuels non évolutifs sulfates : mensuels évolutifs jusqu'en 2013	AODs (Nabat et al, 2013) carbones suies, organiques, sels marins, poussières désertiques : mensuels non évolutifs sulfates : Non	
Aérosols volcaniques	Non	Non	
Gaz à effet de serre	Observés avant 2005, puis RCP4.5	Observés avant 2000, puis A1B	
Constante Solaire	Valeurs de CMIP5 (moy=1361 W/m ²)	1361 W/m ² , puis valeurs de CMIP5 après 2008	
Ozone	Climatologie Univ.Reading	Climatologie UGAMP (Li and Shine, 1999)	

Tableau 2.4 – Caractéristiques des simulations d'évaluation avec CNRM-ALADIN et CNRM-AROME utilisées dans la thèse

1740 2.3.2 Les simulations en climat présent et futur

1741 Trois simulations de 20 ans en climat présent et futur que j'avais préparées et qui ont été
 1742 lancées par Antoinette Alias ont été réalisées avec CNRM-AROME sur le domaine ALP-
 1743 3 : une simulation représentant le climat présent, appelée simulation historique, et deux
 1744 simulations en climat futur, pour le milieu de siècle et la fin de siècle, toutes forcées par le
 1745 GCM CNRM-CM5 r1i1p1 forcé par les concentrations des gaz à effet de serre observées en
 1746 historique et suivant le RCP8.5 en scénario. Les détails de ces simulations et des simulations
 1747 de CNRM-ALADIN qui les forcent et qui avaient été réalisées par Lola Corre sont présentés
 1748 dans la Table 2.5.

1749 L'erreur concernant la prise en compte des concentrations des gaz à effet de serre est
 1750 également présente dans ces simulations. En effet, les concentrations de gaz à effet de
 1751 serre devraient être celles observées pour l'historique et celles du scénario RCP8.5 pour
 1752 les scénarios, comme pour CNRM-ALADIN (et CNRM-CM5). Ce ne sont pas ces valeurs
 1753 qui ont été prises à l'intérieur du domaine du CP-RCM, mais celles du scénario A1B à
 1754 partir de 2000 (cf. Figure 2.14 pour les concentrations de CO₂). Ce scénario, utilisé pour
 1755 CMIP3 et de type intermédiaire, propose des valeurs proches de celles du RCP6.0, donc
 1756 plus faibles que celles du RCP8.5. Néanmoins, les valeurs prises en compte par les modèles
 1757 forceurs sont correctes et il est probable que le forçage latéral soit l'effet prédominant. On
 1758 peut supposer que l'effet de cette erreur est plutôt faible compte-tenu de la petite taille
 1759 du domaine du CP-RCM, mais, pour l'instant, une simulation de comparaison prenant
 1760 en compte les concentrations du RCP8.5 n'a pas encore été réalisée pour confirmer cette
 1761 supposition.

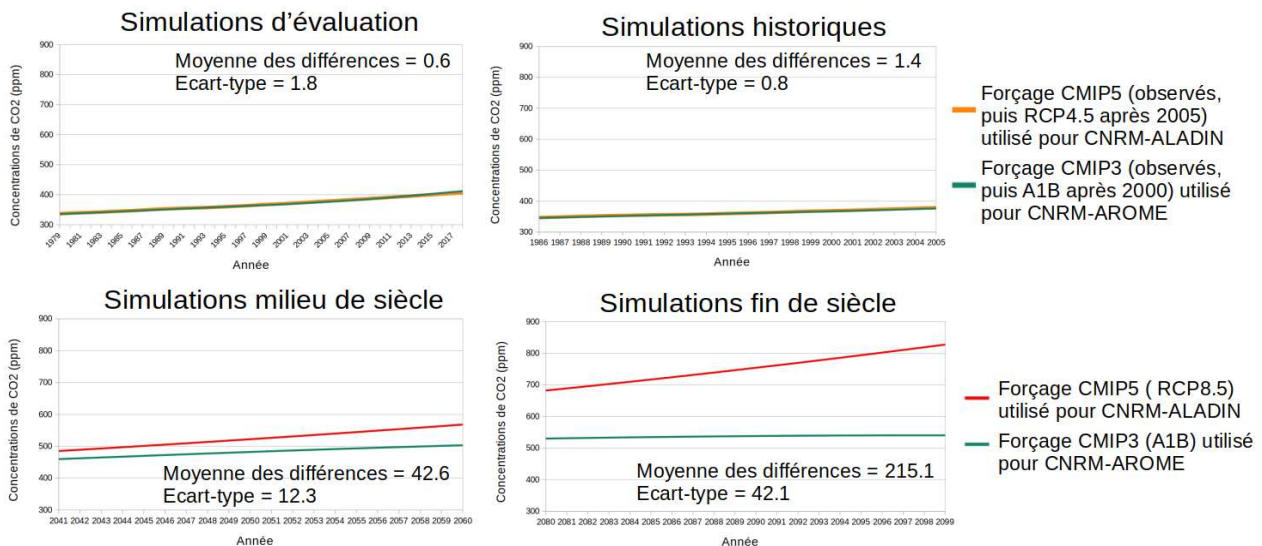


FIGURE 2.14 – Comparaison des concentrations de CO₂ pour les différentes simulations de CNRM-ALADIN et CNRM-AROME suite à l'erreur dans les valeurs annuelles de gaz à effet de serre pour CNRM-AROME

Caractéristiques	CNRM-ALADIN		CNRM-AROME				
	Historique	Scénario	Historique		Milieu de siècle	Scénario Fin de siècle	
Résolution horizontale	12.5 km		2.5 km				
Nb niveaux verticaux	91		60				
Version modèle	v6 (Nabat et al, 2020)		Cycle 41t1op1 (Termonia et al, 2018)				
Simulation	EUC12v63-2.02	EUC12v63-3.02	FPS25-2.22	FPS25-2.21	FPS25-3.22	FPS25-3.21	FPS25-3.23
Période	1951-2005	2006-2100	1986-1995	1996-2005	2041-2060	2080-2089	2090-2099
Spin-up	1949-1950	EUC12v63-2.0	1984-1985	1994-1995	2039-2040	2078-2079	2088-2089
Domaine	EURO-CORDEX		ALP-3				
Forçage latéral (LBC)	historical CNRM-CM5 r1i1p1	RCP8.5 CNRM-CM5 r1i1p1	EUC12v63-2.02		EUC12v63-3.02		
Fréq. forçage	6 h		1 h				
Pilotage spectral	Non		Non				
SSTs	mensuelles CNRM-CM5	mensuelles CNRM-CM5	mensuelles CNRM-CM5		mensuelles CNRM-CM5		
Aérosols	AODs Szopa (Szopa et al, 2013) carbones suies, organiques, sulfates : mensuels évolutifs sels marins, poussières désertiques : mensuels non évolutifs		AODs Szopa (Szopa et al, 2013) carbones suies, organiques, sulfates : mensuels évolutifs sels marins, poussières désertiques : mensuels non évolutifs				
Aérosols volcaniques	Amman (Ammann et al, 2007) avant 1999, puis constants		Amman (Ammann et al, 2007) avant 1999, puis constants				
Gaz à effet de serre	Observés	RCP8.5	Observés avant 2000, puis A1B		A1B		
Constante Solaire	Valeurs de CMIP5		Valeurs de CMIP5				
Ozone	Ozone issu de CNRM-CM5		Climatologie UGAMP (Li and Shine, 1999)				

Tableau 2.5 – Tableau descriptif des simulations historiques et futures avec CNRM-ALADIN et CNRM-AROME utilisées dans cette thèse

2.4 L'ensemble multi-modèle du CORDEX-FPS Convection

Présenté dans la Section 1.3.5, l'exercice international CORDEX-FPS Convection (Coppola et al, 2020) a permis la réalisation d'un ensemble inédit d'une dizaine de simulations de CP-RCMs sur un domaine commun pan-Alpin (ALP-3) et pour des périodes de 10 ans en évaluation (2000-2009), historique (1996-2005), milieu de siècle (2041-2050) et fin de siècle (2090-2099) selon le scénario RCP8.5.

Le scénario RCP8.5 (Meinshausen et al, 2011) ou "business as usual", a été choisi dans le protocole commun du CORDEX-FPS Convection pour les simulations en climat futur. Même s'il n'est pas forcément le plus crédible des scénarios illustratifs RCP au-delà de 2050 (Hausfather and Peters, 2020), il présente l'avantage d'avoir des simulations de changement climatique avec un rapport signal sur bruit maximum, ce qui permet d'éviter d'avoir à réaliser de grands ensembles.

Les CP-RCMs utilisés sont tous des modèles à aire limitée, non-hydrostatiques et qui résolvent explicitement la convection profonde. Les résolutions horizontales sont comprises entre 2.2 à 3 km et le nombre de niveaux verticaux varie de 40 à 70. Six familles de CP-RCMs sont représentées dans l'ensemble :

- **AROME en mode climat**

Comme présenté dans la Section 2.2.4, le modèle AROME utilisé pour de longues simulations climatiques s'appuie sur le modèle de PNT AROME. Il est utilisé en mode climat non seulement par le CNRM (Caillaud et al, 2021; Lucas-Picher et al, 2023), mais également par le KNMI et par la communauté HARMONIE-Climate (DMI, Met Norway et SMHI) qui utilisent tous la même version du modèle appelée HCLIM38-AROME (Belušić et al, 2020), version qui diffère un peu de CNRM-AROME41 utilisé au CNRM. Les principales différences sont : la version du modèle (cycle 38 pour HCLIM38-AROME et 41 pour CNRM-AROME41); des versions différentes de SURFEX (7.3 pour CNRM-AROME41 et 8 pour HCLIM38-AROME) avec une autre paramétrisation des lacs et rivières (FLAKE) et des surfaces (ISBA-Diff ES) dans HCLIM38-AROME et le forçage aérosol pour les simulations d'évaluation (Tegen et al (1997) pour HCLIM38-AROME et Nabat et al (2013) pour CNRM-AROME41).

- **COSMO en mode climat**

Le modèle COSMO (Consortium for Small Scale Modeling) en mode climat, appelé CCLM, se base également sur le modèle de PNT COSMO. Ce modèle est utilisé par un ensemble de groupes de recherche du consortium CCLM qui ont été parmi les premiers à réaliser des simulations climatiques avec des CP-RCMs. La plupart des simulations (Rockel et al, 2008; Baldauf et al, 2011) réalisées pour le FPS Convection sont basées sur la version 5.0 de COSMO, mises à part celles de l'ETHZ qui utilisent une version plus récente de COSMO capable de fonctionner sur des GPUs et sans schéma de convection peu profonde (Leutwyler et al, 2017).

- 1802 • **RegCM-NH**
- 1803 Le modèle RegCM4 (Regional Climate Modeling system) utilisé (Giorgi et al, 2012;
- 1804 Coppola et al, 2021b) est une version non-hydrostatique et haute résolution, récem-
- 1805 ment développée, basée sur le RCM RegCM. Ce modèle est utilisé par l’ICTP et le
- 1806 DKRZ, mais avec des choix de physique différents et une résolution de 4 km pour le
- 1807 DKRZ (seul modèle dépassant les 3 km de résolution).
- 1808 • **REMO-NH**
- 1809 Le modèle REMO (REgional MOdel) utilisé (Coppola et al, 2020; Ban et al, 2021)
- 1810 est une version non-hydrostatique et haute résolution, récemment développée, basée
- 1811 sur le RCM REMO. Il est utilisé seulement par le GERICS.
- 1812 • **UM en mode climat**
- 1813 Le modèle UM (Unified Model) se base sur le modèle de PNT et est utilisé en mode
- 1814 climat (Chan et al, 2020) par le Met-Office (UKMO). Le schéma de convection peu
- 1815 profonde n’est pas activé.
- 1816 • **WRF en mode climat**
- 1817 Le modèle WRF (Weather Research and Forecasting) s’appuie lui-aussi sur le modèle
- 1818 de PNT et est utilisé en mode climat par plusieurs groupes de recherche (Powers et al,
- 1819 2017; Skamarock, 2008). Différentes versions de WRF sont utilisées avec des choix de
- 1820 paramétrisations physiques pouvant fortement différer, en particulier pour les simu-
- 1821 lations d’évaluation. Il faut noter également que, entre les simulations d’évaluation et
- 1822 les simulations en mode historique et scénario, pour un même groupe de recherche,
- 1823 des versions différentes de WRF ont pu être utilisées. C’est le cas pour les simulations
- 1824 avec WRF-IDL-FZJ et WRF-IPSL étudiées dans les chapitres suivants. De plus, il
- 1825 y a deux simulations d’évaluation différentes pour WRF-IPSL, avec des versions dif-
- 1826 férentes de WRF, utilisées pour l’étude eulérienne de Ban et al (2021) et dans mon
- 1827 étude lagrangienne.
- 1828 Les domaines de toutes les simulations couvrent au minimum le domaine commun
- 1829 ALP-3 (cf. Figure 1.34). Trois groupes de recherche ont choisi de couvrir un domaine plus
- 1830 large, couvrant une grande partie de l’Europe et appelé REU-2 pour le UKMO pour toutes
- 1831 les simulations et l’ETHZ pour la simulation d’évaluation et une simulation fin de siècle
- 1832 en Pseudo Global Warming (non utilisée dans cette thèse), et couvrant la Méditerranée
- 1833 (MED-3, domaine de Med-CORDEX) pour le GUF.
- 1834 Le protocole du FPS Convection n’a pas donné de contraintes sur la stratégie de forçage
- 1835 qui a été décidée par chaque groupe suivant leurs besoins et leurs intérêts propres, que ce
- 1836 soit pour l’utilisation ou non d’un RCM intermédiaire, son choix et pour le choix du GCM.
- 1837 La plupart des groupes ont choisi un forçage à deux niveaux avec un RCM intermédiaire
- 1838 à 12 ou 25 km, mais certains ont choisi un forçage direct par ERA-Interim pour les simu-
- 1839 lations d’évaluation (UM-UKMO, CCLM-JLU) ou pour les projections (CCLM-JLU). Les
- 1840 simulations historique et scénario de UM-UKMO sont forcées par un GCM haute résolution
- 1841 (25 km) avec des SSTs prescrites venant de SSTs quotidiennes observées pour la simulation
- 1842 historique et de SSTs observées auxquelles sont ajoutés les changements moyens sur 20
- 1843 ans venant de simulations couplées de HadGEM2-ES pour les projections. La fréquence

1844 de couplage et le nombre de points de la zone intermédiaire où sont rappelées les LBCs
1845 varient de manière importante selon les simulations (respectivement, de 1h à 6h, et de 8 à
1846 50 points) et ont été choisies par chaque groupe en fonction de leur expérience en PNT et
1847 en climat.

1848 Davantage d'informations sur ces modèles peuvent être trouvées dans Ban et al (2021)
1849 et sur le wiki du FPS Convection⁵.

1850 La Table 2.6 contient la liste des simulations d'évaluation utilisées dans le Chapitre 3
1851 pour l'étude lagrangienne qui est un sous-ensemble de la vingtaine de simulations d'évalua-
1852 tion utilisées dans Ban et al (2021) : ce sont celles pour lesquelles les simulations historiques
1853 et scénarios sont également disponibles.

1854 La Table 2.7 contient les couples CP-RCM/GCM utilisés pour l'étude de l'évolution
1855 future des épisodes méditerranéens (Chapitre 4).

1856 Les modèles utilisés sont donc les mêmes pour les études lagrangiennes en mode éva-
1857 luation et en mode projection, excepté le CCLM-GUF qui n'est disponible que pour la
1858 simulation d'évaluation et le CCLM-DWD pour lequel seules les projections ont été réali-
1859 sées.

5. <https://www.hymex.org/cordexfps-convection/wiki/doku.php>

NOM	CP-RCM	dx (km)	Niveaux verticaux	RCM	Domaine RCM /dx (km)	Freq. /zone I
AROME-CNRM	CNRM-AROME41t1 ^a	2.5	60	CNRM-ALADINv6 ^b	MED-11/12 (PS)	1h/21pts
AROME-HCLIM (DMI,METNorway,SMHI)	HCLIM38-AROME ^c	3	65	HCLIM38-ALADIN ^c	Europe/12	3h/8pts
AROME-KNMI	HCLIM38-AROME ^c	2.5	65	RACMO ^d	Europe/12	1h/8pts
CCLM-BTU	COSMO-CCLM5-0-14 ^e	3	50	COSMO-CCLM4-0-17 ^f	EUR-11/12	3h/23pts
CCLM-CMCC	COSMO-CCLM5-0-9 ^e	3	50	COSMO-CCLM5-0-9 ^g	EUR-11/12	6h/23pts
CCLM-ETHZ	COSMO-crCLIM ^h	2.2 (REU-2)	60	COSMO-crCLIM ^h	Europe/12	1h/50pts
CCLM-JLU	COSMO-CCLM5-0-15 ^e	3	50	-	-	3h/50pts
CCLM-KIT	COSMO-CCLM5-0-15 ^e	3	60	COSMO-CCLM4-0-17 ^f	Europe/25	6h/23pts
CCLM-GUF	COSMO-CCLM5-0-9 ^e	3 (MED-3)	40	COSMO-CCLM5-0-9	MED-11 élargi/12	6h/18pts
REMO-GERICS	REMO-2017 NH version ⁱ	3	49	REMO_MPI -remo2015_v2_mpi ^j	Europe/12	1h/8pts
RegCM-ICTP	RegCM4-7-1 ^k	3	41	RegCM4-7-1 ^k	Europe/12	6h/40pts
UM-UKMO	HadREM3-RA -UM10.1 ^l	2.2 (REU-2)	70	-	-	6h/24pts
WRF-FZJ-IDL	WRF381BB ^m	3	50	WRF381BB ^m	EUR-15/15	6h/10pts
WRF-IPSL	WRF381BE ^m	3	50	WRF381BE ^m	EUR-15/15	6h/10pts

^aCaillaud et al (2021) ^bNabat et al (2020) ^cBelušić et al (2020) ^d[van Meijgaard et al (2008, 2012); de Vries et al (2022)]

^e[Rockel et al (2008); Baldauf et al (2011)] ^fKeuler et al (2016) ^gAdinolfi et al (2021) ^hLeutwyler et al (2017)

ⁱ[Coppola et al (2020); Ban et al (2021)] ^j[Jacob et al (2012); Vautard et al (2021)]

^k[Giorgi et al (2012); Coppola et al (2021b)] ^lChan et al (2020) ^m[Powers et al (2017); Skamarock (2008)]

Tableau 2.6 – Tableau des simulations d'évaluation de l'ensemble FPS Convection utilisées dans la thèse pour l'évaluation lagrangienne. Le nom de chaque simulation est composé du nom du CP-RCM et de celui de l'institut qui a réalisé la simulation. MED est le domaine Med-CORDEX et EUR, le domaine EURO-CORDEX. PS lorsque l'option de pilotage spectral est activée

NOM	CP-RCM	dx (km)	RCM	RCM domain /dx (km)	GCM
AROME-CNRM	CNRM-AROME41t1 ^a	2.5	CNRM-ALADINv6 ^b	EUR-11/12	CNRM-CM5 r1 ^c (CMIP5)
AROME-HCLIM	HCLIM38-AROME ^d	3	HCLIM38-ALADIN ^d	Europe/12	EC-Earth r12 ^e (CMIP5)
AROME-KNMI	HCLIM38-AROME ^d	2.5	RACMO ^f	Europe/12	EC-Earth r14 r04 r13 ^e
CCLM-BTU	COSMO-CCLM5-0-14 ^g	3	COSMO-CCLM4-8-17 ^h	EUR-11/12	CNRM-CM5 r1 ^{*c}
CCLM-CMCC	COSMO-CCLM5-0-9 ^g	3	COSMO-CCLM5-0-9 ⁱ	EUR-11/12	EC-Earth r12 ^e (CMIP5)
CCLM-DWD	COSMO-CCLM5-0-15 ^g	3	COSMO-CCLM4-8-17 ^h	EUR-11/12	HadGEM2-ES r1 ^j (CMIP5)
CCLM-ETHZ	COSMO-crCLIM ^k	2.2	COSMO-crCLIM ^k	Europe/12	MPI-ESM-LR r1 ^l (CMIP5)
CCLM-JLU	COSMO-CCLM5-0-15 ^g	3	-	-	MPI-ESM-LR r1 ^l (CMIP5)
CCLM-KIT	COSMO-CCLM5-0-15 ^g	3	COSMO-CCLM4-8-17 ^h	EUR-11/12	MPI-ESM-LR r1 ^l (CMIP5)
REMO-GERICS	REMO-2017 NH version ^m	3	REMO_MPI -remo2015_v2_mpi ⁿ	Europe/12	MPI-ESM-LR r3 ^l (CMIP5)
RegCM-ICTP	RegCM4-7-1 ^o	3	RegCM4-7-1 ^o	Europe/12	HadGEM2-ES r1 ^j (CMIP5)
UM-UKMO	HadREM3-RA -UM10.1 ^p	2.2 (REU-2)	HadGEM3-GC3.1 -N512 ^q (HiresMIP)	Global/25	SST-SIC from runs of HadGEM2-ES ^j (CMIP5)
WRF-FZJ-IDL	WRF381CA ^r	3	WRF381CA ^r	EUR-15/15	EC-Earth r12 ^e (CMIP5)
WRF-IPSL	WRF381CE ^r	3	WRF381CE ^r	EUR-15/15	IPSL-CM5A-MR r1 ^s (CMIP5)

^aCaillaud et al (2021) ^bNabat et al (2020) ^cVoldoire et al (2013)

^dBelušić et al (2020) ^eHazeleger et al (2012) ^f[van Meijgaard et al (2008, 2012); de Vries et al (2022)]

* Pour la simulation historique de CCLM-BTU, le RCM a pour LBC des conditions venant d'un autre membre du GCM CNRM-CM5 pris par erreur et donc qui ne sont pas cohérentes avec les SSTs et SICs (<https://www.euro-cordex.net/078730/index.php.en>).

^g[Rockel et al (2008); Baldauf et al (2011)] ^hKeuler et al (2016) ⁱAdinolfi et al (2021) ^jJones et al (2011) ^kLeutwyler et al (2017)

^l[Marsland et al (2003); Raddatz et al (2007)] ^m[Coppola et al (2020); Ban et al (2021)] ⁿ[Jacob et al (2012); Vautard et al (2021)]

^o[Giorgi et al (2012); Coppola et al (2021b)] ^pChan et al (2020) ^qMizielinski et al (2014)

^r[Powers et al (2017); Skamarock (2008)] ^sDufresne et al (2013)

Tableau 2.7 – Tableau des simulations de l'ensemble du FPS Convection utilisées dans la thèse pour les projections climatiques. Le nom de chaque simulation est composé du nom du CP-RCM et de celui de l'institut qui a réalisé la simulation

1860 2.5 L'approche orientée objet pour la détection et le 1861 suivi des épisodes méditerranéens

1862 2.5.1 Choix de l'algorithme

1863 Une liste non exhaustive de différents algorithmes de détection et de suivi d'objets
1864 précipitants a été donnée dans la Section 1.4.

1865 Le choix de l'algorithme pour mon étude des épisodes méditerranéens s'est essentielle-
1866 ment fait selon les méthodes d'appariement des cellules. En effet, si la détection des cellules
1867 est similaire pour les différents algorithmes avec des points de grille contigus supérieurs à
1868 un seuil donné, les méthodes d'appariement sont plus ou moins complexes et dépendent des
1869 objets que l'on souhaite détecter et suivre. Ainsi, pour les algorithmes MODE ou TOOCAN,
1870 l'appariement se fait simplement par recouvrement de cellules entre deux pas de temps,
1871 ce qui est pertinent pour des systèmes de grande taille (comme les MCSs américains ou
1872 les systèmes convectifs tropicaux), mais peut être limitatif pour des cellules plus petites.
1873 L'algorithme de l'Université de Francfort prend en compte le déplacement des cellules en
1874 fonction des vitesses du vent à 500, 700 et 850hPa, ce qui peut s'avérer problématique
1875 pour les cellules rétrogrades qui ne se déplacent pas selon le flux atmosphérique et qui sont
1876 fréquentes lors d'épisodes méditerranéens. Les algorithmes DYMECS et OSIRIS utilisent
1877 le déplacement des cellules aux pas de temps précédents pour réaliser l'appariement, ce
1878 qui permet de prendre en compte les déplacements des cellules en fonction des conditions
1879 météorologiques, mais aussi en fonction de leur déplacement propre qui dépend du type de
1880 système convectif. Cette dernière méthode d'appariement semble particulièrement adapté
1881 aux systèmes précipitants méditerranéens.

1882 Le choix s'est donc orienté vers ce dernier type d'algorithme, et pour des raisons d'ac-
1883 cessibilité, finalement vers OSIRIS qui se base sur une méthode développée au CNRM
1884 (Morel and Senesi, 2002a) et qui est toujours utilisé en prévision immédiate à Météo-
1885 France. De plus, cet algorithme a déjà été appliqué à des sorties issues de simulations
1886 d'AROME PNT pour l'évaluation du modèle et de sa capacité à représenter les caractéris-
1887 tiques des systèmes convectifs (Brousseau et al, 2016).

1888 Pour confirmer ce choix, il a fallu tout d'abord adapter l'outil avec le passage, en en-
1889 trée, des champs de réflectivités radar instantanées 5 minutes dans sa version de prévision
1890 immédiate à des cumuls horaires de précipitation observés ou simulés. Le transfert et l'adop-
1891 tion de cet outil ont été faits grâce à l'aide d'Isabelle Bernard-Bouissières (DIROP/PI),
1892 en charge de l'outil OSIRIS à Météo-France. Notamment, des réglages pour l'appariement
1893 des cellules ont dû être faits et ont été validés pour plusieurs cas d'étude où les cellules
1894 sélectionnées et les trajectoires produites par l'algorithme ont été comparées aux images
1895 de cumuls horaires de précipitation pour chaque pas de temps. Un exemple de détection et
1896 de suivi de cellules est donné pour la trajectoire du système précipitant principal observé
1897 lors de l'épisode méditerranéen des Alpes-Maritimes des 2-3 octobre 2020 (cf. Figure 2.15).

1898 Ces tests ont permis de valider le choix de l'algorithme OSIRIS pour l'étude des systèmes
1899 précipitants des épisodes méditerranéens observés ou simulés par des CP-RCMs.

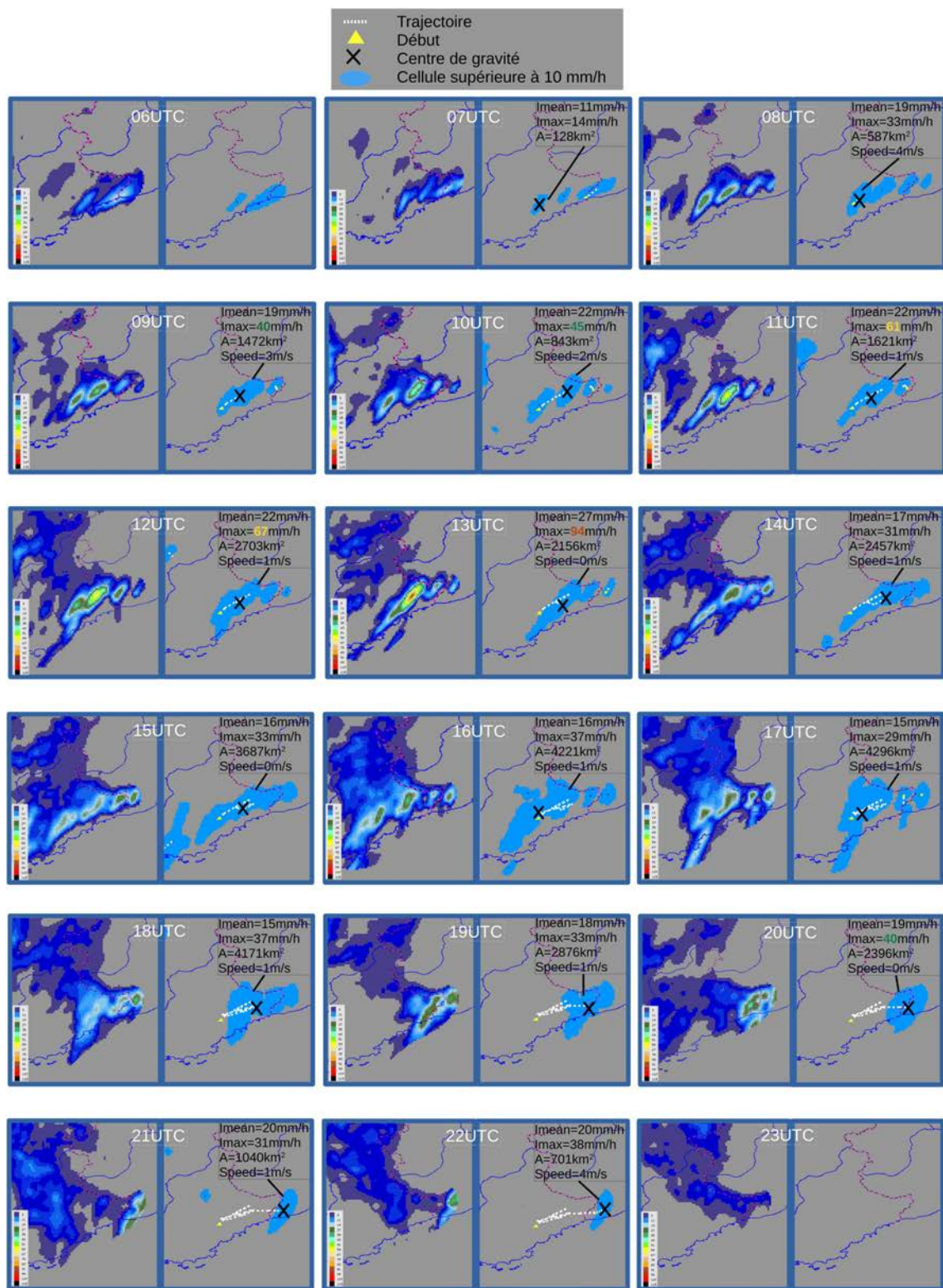


FIGURE 2.15 – Exemple de suivi de cellules supérieures à 10 mm/h pour la trajectoire principale dans le cas de l'épisode méditerranéen des Alpes-Maritimes entre 06 et 23 UTC le 2 octobre 2020. Pour chaque heure, à gauche, les cumuls de précipitation en une heure observés et à droite, les cellules sélectionnées, les informations associées (centre de gravité, intensité moyenne, maximale, surface et vitesse de propagation) et la trajectoire qui se dessine en pointillé blanc au fur et à mesure du déplacement de système

1900 2.5.2 Principe

1901 L'algorithme de tracking, basé sur l'outil de détection et de suivi OSIRIS et la librairie
1902 ASPIC, est décrit dans l'article Caillaud et al (2021) (Chapitre 3), mais les principaux
1903 éléments sont repris ici.

1904 La description détaillée de la méthode de détection et de suivi est donnée dans Morel and Senesi
1905 (2002a). La méthode se décompose en quatre étapes principales (cf. Figure 2.16) :

1906 — Première étape : Interpolation et lissage

1907 Après avoir interpolé les données sur la grille régulière ALP-3i (cf. Section 2.6.1), un
1908 lissage spécifique est effectué pour rendre le champ de précipitation moins bruité afin
1909 de faciliter l'appariement des cellules entre deux pas de temps, tout en préservant les
1910 valeurs élevées. Un premier lissage remplace chaque point de grille par une moyenne
1911 pondérée des huit points de grille adjacents. Ensuite, un second lissage consiste à
1912 appliquer un filtre gaussien à faible écart-type (0,5) sur une fenêtre mobile de 5×5
1913 points de grille. La valeur faible de l'écart-type permet un lissage léger.

1914 — Deuxième étape : détection des cellules

1915 Les cellules sont définies toutes les heures, à l'instant noté (t). Une cellule est définie
1916 comme un ensemble de points de grille contigus dont l'intensité de précipitation
1917 dépasse un seuil donné, avec, comme condition, une surface minimale de 20 km^2 (soit
1918 au moins deux points de grille). Pour représenter les différentes gammes d'intensité
1919 des systèmes précipitants, sept seuils sont choisis : 2, 5, 10, 15, 20, 25 et 30 mm/h.

1920 — Troisième étape : suivi des cellules

1921 Les trajectoires sont construites en identifiant des liens entre les cellules à différents
1922 pas de temps. Un algorithme complexe mélangeant des conditions de recouvrement
1923 et de corrélation est appliqué.

1924 *Condition de recouvrement* : les cellules de l'image au temps (t-1h) sont déplacées
1925 avec la vitesse calculée entre les images au temps (t-1h) et (t-2h) et comparées aux
1926 cellules de l'image au temps (t). S'il y a une cellule sur l'image à l'instant (t) qui
1927 recouvre la cellule de (t-1h) déplacée, avec un taux de recouvrement minimum de
1928 15%, alors l'appariement est fait entre ces deux cellules. Cette condition basée sur
1929 la vitesse permet de prendre en compte les spécificités des cellules en fonction des
1930 conditions météorologiques.

1931 *Condition de corrélation* : Les corrélations spatiales entre les cellules à l'instant (t)
1932 et (t-1h) sont calculées dans une boîte autour de la cellule, boîte dont la taille varie
1933 en fonction de la taille de la cellule et de la présence de cellules pères potentiels si la
1934 première condition de recouvrement est remplie : l'appariement se fait avec la cellule
1935 pour laquelle le taux de corrélation le plus élevé est trouvé, avec une corrélation
1936 minimale de 0,4.

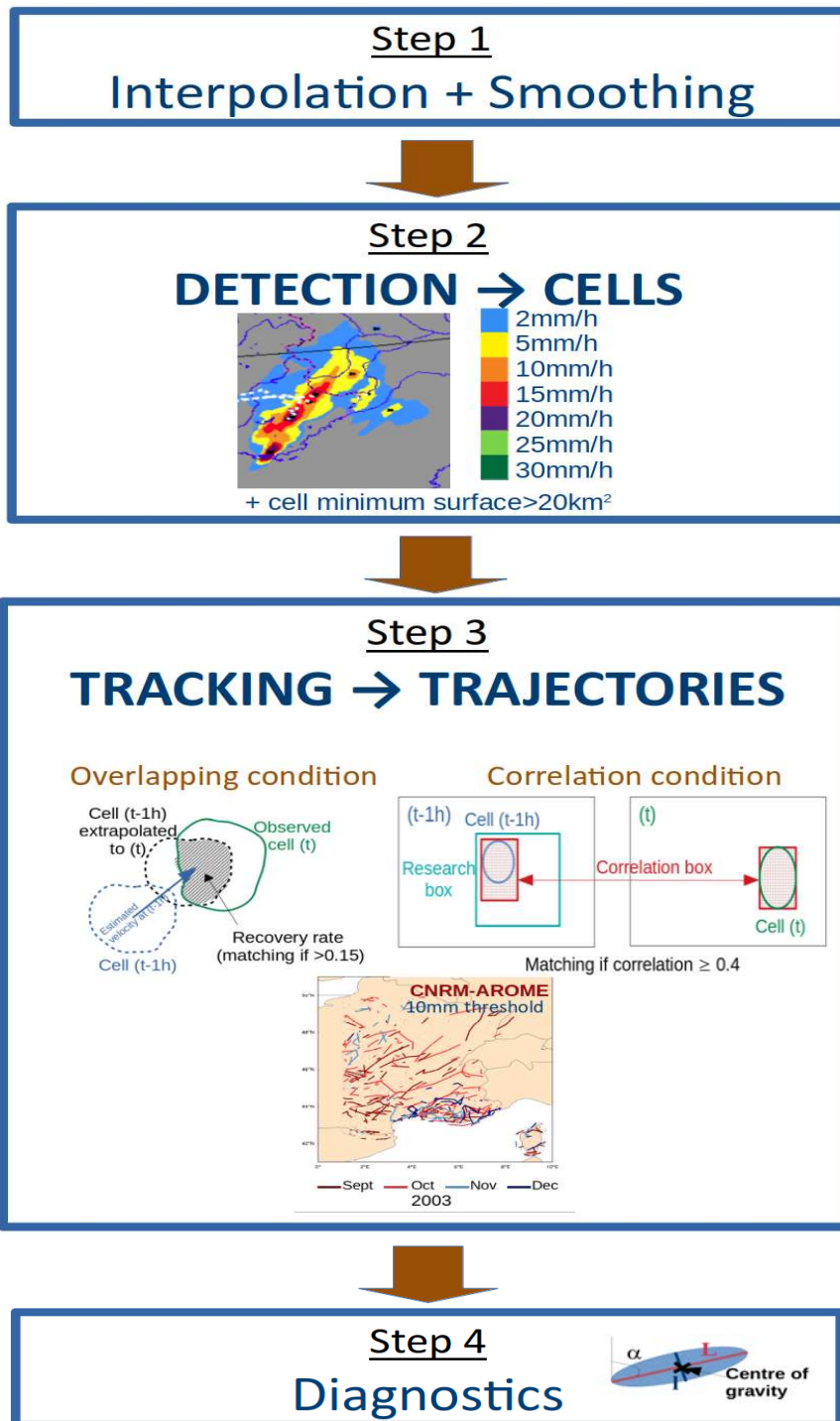


FIGURE 2.16 – Schéma illustrant les étapes de l’algorithme de détection et de suivi des systèmes précipitants

1937
1938
1939
1940
1941
1942
1943
1944
1945

— **Quatrième étape : diagnostics**

A chaque pas de temps (t), chaque cellule c est schématisée sous la forme d'une ellipse avec un centre de gravité défini par ses latitude $lat_c(t)$ et longitude $lon_c(t)$, les longueurs du petit axe $l_c(t)$ et du grand axe $L_c(t)$ et un angle $\alpha_c(t)$ par rapport à la verticale. Pour chaque cellule, l'algorithme fournit également des informations sur sa surface $A_c(t)$ (A pour Area), son intensité moyenne $I_{mean_c}(t)$, son intensité maximale $I_{max_c}(t)$ et sa vitesse de propagation avec la direction $Dir_c(t)$ et l'intensité $S_c(t)$ (S pour Speed).

Un post-traitement assemble les cellules appartenant à une même trajectoire et calcule les principales caractéristiques de chaque trajectoire :

Caractéristique	Nom	Unité	Formule
Durée	duration	h	
Intensité moyenne	I_{mean}	mm/h	$\frac{1}{duration} \sum_{duration} I_{mean_c}(t)$
Intensité maximale	I_{max}	mm/h	$\max_{duration} (I_{max_c}(t))$
Surface moyenne	A_{mean}	km ²	$\frac{1}{duration} \sum_{duration} A_c(t)$
Surface maximale	A_{max}	km ²	$\max_{duration} (A_c(t))$
Vitesse de propagation moyenne	S_{mean}	m/s	$\frac{1}{duration} \sum_{duration} S_c(t)$
Vitesse de propagation maximale	S_{max}	m/s	$\max_{duration} (S_c(t))$
Volume	volume	m ³	$\sum_{duration} \alpha \times I_{mean_c}(t) \times A_c(t) \times dt$ avec $\alpha = 1/1000$ coefficient pour convertir les mm.km ² en m ³ et $dt = 1h$
Sévérité	severity	m ³	$\sum_{duration} \alpha \times I_{mean_c}(t) \times A_c(t) \times \frac{S_{ref}}{S_c(t)} \times dt$ avec $\alpha = 1/1000$ coefficient pour convertir les mm.km ² en m ³ , $S_{ref} = 35$ m/s et $dt = 1h$

Tableau 2.8 – Les principales caractéristiques de chaque trajectoire

1946
1947
1948
1949

Les diagnostics peuvent être calculés pour toutes les trajectoires de durée minimale une heure et pour chaque seuil. Ils sont calculés sur les champs interpolés et lissés utilisés en entrée de l'outil OSIRIS.

1950 2.5.3 L'indice de sévérité

1951 J'ai introduit l'indice de sévérité afin de caractériser les trajectoires les plus sévères d'un
1952 point de vue de l'impact hydrologique. En considérant la trajectoire d'une cellule dépassant
1953 un seuil d'intensité donné, l'indice de sévérité (cf. Table 2.8) est défini comme la somme,
1954 sur l'ensemble de la durée de vie de la cellule, du produit de l'intensité moyenne et de la
1955 surface à chaque pas de temps, avec un coefficient de pondération qui prend en compte
1956 l'effet de la vitesse de déplacement de la cellule. L'indice de sévérité correspond donc au
1957 volume de précipitation tombé au cours de la trajectoire d'un système précipitant donné,
1958 pondéré par la vitesse du système. En effet, pour des systèmes convectifs de même intensité,
1959 les cumuls de précipitation seront plus importants pour un endroit donné si le système se
1960 déplace plus lentement ou s'il est quasi-stationnaire (Ducrocq et al, 2008; Bresson et al,
1961 2012). Grâce à l'introduction d'un coefficient inversement proportionnel à la vitesse de
1962 propagation du système, un système quasi-stationnaire présentera un indice de sévérité
1963 plus élevé que le même système se déplaçant rapidement. La valeur de S_{ref} est fixée à
1964 35 m/s, ce qui correspond à la vitesse maximale observée dans COMEPHORE pendant
1965 les vingt automnes (SOND, 1997-2016), cohérente avec les vitesses de déplacement des
1966 systèmes convectifs (Johnson and Ciesielski, 2020).

1967 2.5.4 Les distributions spatiales de systèmes précipitants ou den- 1968 sités

1969 Pour représenter les zones touchées par les systèmes précipitants, des cartes de distri-
1970 bution spatiale des systèmes précipitants pour des seuils d'intensité définis (cf. Figure 2.17)
1971 sont présentées et constituent l'empreinte spatiale des trajectoires : ainsi, pour une période
1972 donnée, tous les points de grille qui composent chaque cellule de chaque trajectoire sont
1973 pris en compte, puis le résultat est normalisé par le nombre d'années.

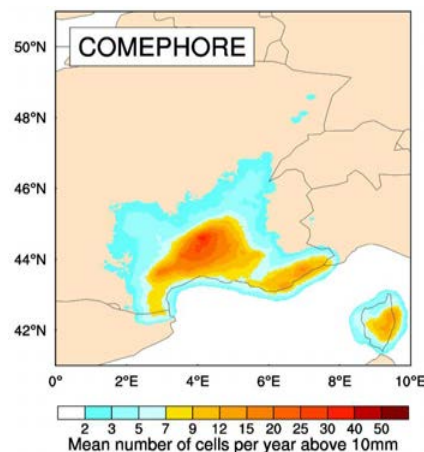


FIGURE 2.17 – Exemple de distribution spatiale du nombre moyen annuel de cellules au-dessus du seuil de 10 mm/h pour les trajectoires obtenues à partir des données observées (COMEPHORE), en automne (SOND) et pour la période 1997-2016

1974 **2.5.5 Les graphes de type Intensity Duration Frequency (IDF)**
1975 **et Intensity Area Frequency (IAF)**

1976 Afin de mieux caractériser les différents types d'événement en combinant leurs caracté-
1977 ristiques deux à deux, nous proposons un graphe appelé IDF (cf. Figure 2.18) pour
1978 maximum Intensity Duration Frequency : l'intensité maximale (I) est représentée sur l'axe
1979 des ordonnées, la durée (D) sur l'axe des abscisses et la fréquence (F) en couleur. Cette
1980 fréquence est définie par l'occurrence de trajectoires pour une combinaison de plages de
1981 valeurs d'intensité maximale et de durée, normalisée par le nombre total de trajectoires. Il
1982 faut noter que ces IDF sont différents de ceux utilisés en hydrologie.

1983 De la même manière, nous présentons des graphes appelés IAF (cf. Figure 2.18) pour
1984 maximum Intensity maximum Area Frequency, avec les surfaces maximales atteintes au
1985 cours de la trajectoire à la place des durées.

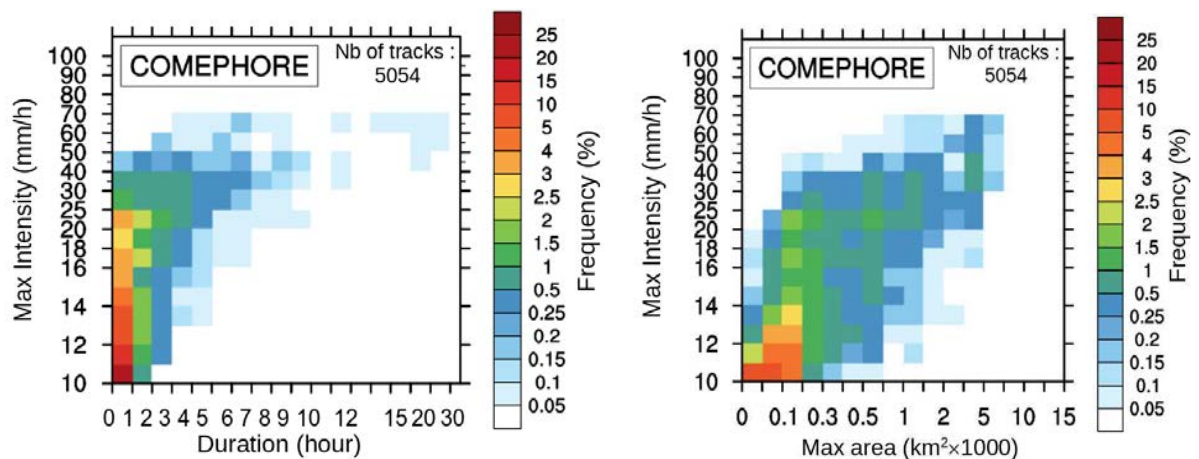


FIGURE 2.18 – Exemple de graphes d'IDF (maximum Intensity Duration Frequency) et d'IAF (maximum Intensity maximum Area Frequency) pour les trajectoires observées (COMEPHORE) dans le sud-est de la France, en automne (SOND) pour la période 1997-2016

1986 Remarque : Suite à l'existence préalable de graphes appelés IDF en hydrologie qui com-
1987 prennent des indications de durées de retour et qui ne correspondent donc pas exactement
1988 aux graphes définis ici, il a été décidé de modifier leur appellation, pour éviter une possible
1989 confusion, dans l'article sur l'évolution future des épisodes méditerranéens présenté dans
1990 le Chapitre 4. Les termes IDF et IAF ont donc été remplacés par les terminologies IDH
1991 (maximum Intensity Duration Histogram) et IAH (maximum Intensity maximum Area
1992 Histogram). Cette correction n'a pas pu être apportée dans le Chapitre 3 comprenant une
1993 publication antérieure à la correction de terminologie apportée.

1994 **2.5.6 Les graphes de type "Bubble plot"**

1995 Afin de combiner encore davantage de caractéristiques des trajectoires sur un même
1996 graphe, nous proposons également un graphique à bulles ou "Bubble plot", inspiré de
1997 Darmaraki et al (2019). Quatre caractéristiques pour chaque trajectoire individuelle sont

1998 ainsi représentées : l'intensité maximale sur l'axe des ordonnées, la durée sur l'axe des
 1999 abscisses, les surfaces maximales suivant la taille des cercles et l'indice de sévérité suivant
 2000 leur couleur. Ces graphiques présentent peu d'intérêt si on les trace pour l'ensemble des
 2001 trajectoires, mais ils peuvent être pertinents pour un sous-ensemble défini de trajectoires.
 2002 L'exemple de la Figure 2.19 permet de positionner l'événement des Alpes-Maritimes des
 2003 2-3 octobre 2020 parmi les dix trajectoires les plus sévères calculées à partir des observa-
 2004 tions de COMEPHORE entre 1997 et 2016 : ses fortes intensités et sa sévérité le placent
 2005 parmi les événements les plus extrêmes observés pendant ces vingt ans, malgré une surface
 2006 couverte relativement restreinte.

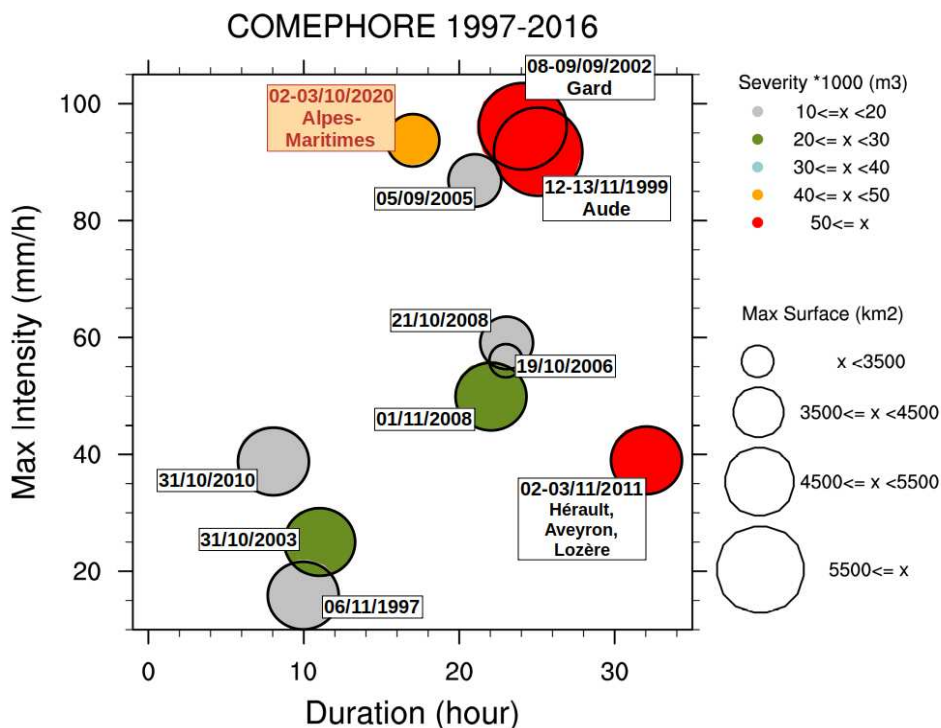


FIGURE 2.19 – Exemple de graphique à bulles ou "Bubble plot" pour les dix trajectoires les plus sévères observés (COMEPHORE) dans le sud-est de la France en automne (SOND) entre 1997 et 2016 et le cas des Alpes-Maritimes des 2-3 octobre 2020

2.5.7 Sélection des systèmes précipitants appartenant aux épisodes méditerranéens français

Les épisodes méditerranéens ne représentent qu'une sous-partie des trajectoires obtenues. Plusieurs critères sont mis en place pour sélectionner les systèmes précipitants faisant partie des épisodes méditerranéens français.

Il faut tout d'abord définir le domaine géographique correspondant, que nous appellerons par la suite "French MED" (cf. Figure 2.20). Cette zone spécifique est définie en s'appuyant sur la méthode utilisée par Ribes et al (2019) pour sélectionner les stations touchées par des événements méditerranéens français. Ainsi, les maxima annuels des précipitations sur un jour (RX1day) sont calculés pour chaque point de grille, entre 1997 et

2017 2016, pour la base de données observées de COMEPHORE. Puis les limites rectangulaires
 2018 de la zone où la moyenne de RX1day est supérieure à 60 mm, seuil utilisé dans Ribes et al
 2019 (2019), sont sélectionnées. Comme les données COMEPHORE ne couvrent pas la mer,
 2020 les points de grille sur mer sont également supprimés pour les données du modèle. La
 2021 Corse est également exclue de cette zone d'étude car, en raison de la mauvaise couverture
 2022 des données radar et stations sur cette île montagneuse, COMEPHORE n'est pas capable
 2023 de représenter correctement les précipitations sur une grande partie de l'île. L'absence de
 2024 données de référence fiables ne permet donc pas d'évaluer le modèle sur cette zone.

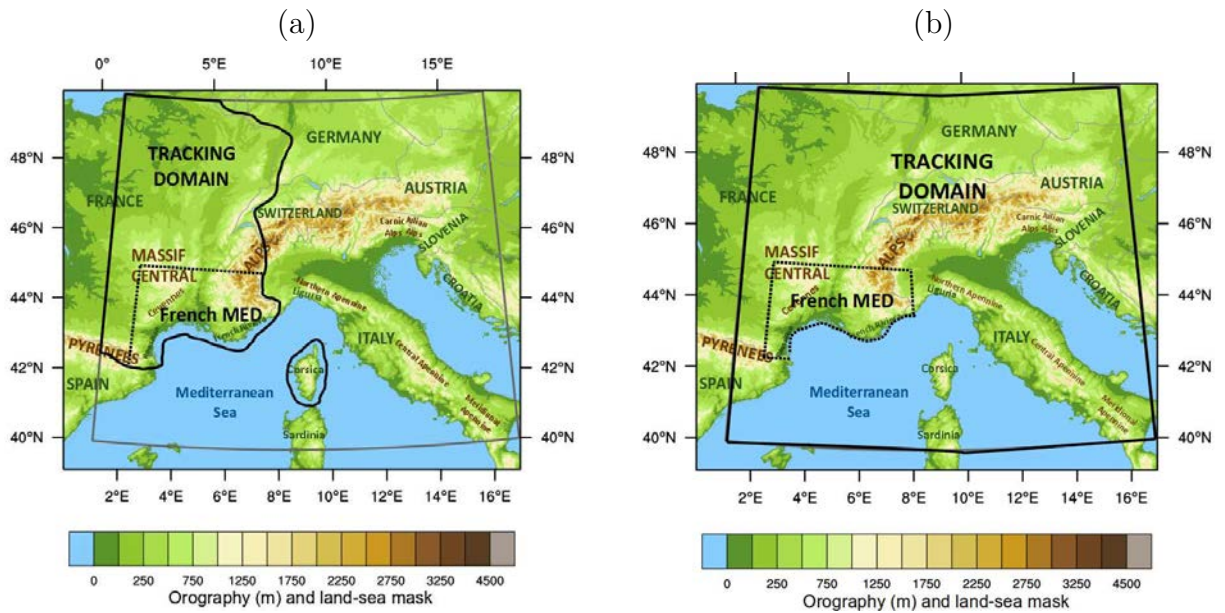


FIGURE 2.20 – Topographie de CNRM-AROME pour la zone centrale physique (C) du domaine pan-alpin et domaine commun du FPS Convection, ALP-3i, délimité par des lignes grises. Dans les Figures (a) et (b), les domaines de tracking sont délimités par des lignes noires et la zone French MED par des lignes noires en pointillée. Le domaine de tracking de (a) est utilisé pour l'évaluation de CNRM-AROME pour l'article Caillaud et al (2021) afin que la zone de tracking corresponde exactement à la zone de tracking pour les données observées de COMEPHORE. La zone de tracking de (b) est celle utilisée pour toutes les autres évaluations et pour l'analyse des projections. On remarquera que la zone French MED diffère légèrement selon le domaine de tracking (a) et (b), mais elle sera toujours choisie de manière identique lorsque des comparaisons seront faites

2025 Après différents tests, plusieurs critères ont été choisis et sont appliqués pour sélection-
 2026 ner les systèmes précipitants appartenant aux épisodes méditerranéens français :

- 2027 • un critère spatial : seules les trajectoires passant par la zone "French MED" sont
 2028 prises en compte ;
- 2029 • un critère temporel : seules les trajectoires ayant lieu entre septembre et décembre
 2030 sont considérées, sachant que l'étude climatologique de Ricard et al (2012) a montré
 2031 que cet automne étendu est la saison d'occurrence des épisodes méditerranéens ;
- 2032 • le seuil d'intensité de 10 mm/h est choisi pour sélectionner les fortes précipitations
 2033 convectives ;

2034 • un dernier critère est ajouté : seules les trajectoires se produisant au cours de journées
2035 où les cumuls de précipitation en 24 heures (calculés sur des périodes de 24 heures
2036 glissantes) dépassent le seuil de 100 mm/j sur au moins un point de grille de la zone
2037 French MED sont prises en compte.

2038 De par les choix faits pour la sélection, un épisode méditerranéen peut donc corres-
2039 pondre à une combinaison de plusieurs systèmes convectifs (Duffourg et al, 2016), et donc
2040 à plusieurs trajectoires. Cet aspect devra pris en compte dans l’interprétation des résultats.

2041 2.5.8 Domaines de tracking

2042 Pour se rapprocher au maximum des caractéristiques des trajectoires obtenues à partir
2043 des données observées de COMEPHORE qui couvrent un domaine restreint par rapport
2044 au domaine de simulation, il a été décidé pour l’évaluation de CNRM-AROME présentée
2045 dans l’article Caillaud et al (2021) (Section 3.1) de choisir une zone de tracking identique
2046 entre les données simulées par le modèle et celles observées (cf. Figure 2.20 a).

2047 Pour toutes les autres analyses, le domaine de tracking (cf. Figure 2.20 b) sera toujours
2048 celui du domaine commun du FPS Convection, nommé ALP-3i et défini ci-après dans la
2049 Section 2.6.1.

2050 2.6 Outils complémentaires

2051 2.6.1 Grilles de référence, interpolation et spin-up spatial

2052 L’analyse des simulations de différents modèles ou des données observées nécessite le
2053 choix de grilles communes où les comparaisons pourront être effectuées et sur lesquelles le
2054 tracking sera fait.

2055 La première grille utilisée est la grille régulière en latitude et longitude, ALP-3i, de
2056 résolution $0,0275^\circ$ (soit environ 3 km) qui est la grille commune définie dans le cadre du
2057 FPS Convection (cf. Figure 2.20). La deuxième grille est la partie pan-alpine de la grille
2058 régulière définie dans le cadre d’EURO-CORDEX, EUR-11i ($0,125^\circ$, soit environ 12 km),
2059 appelée ALP-11i. Elle est utilisée lors de la comparaison avec les données du RCM à 12.5
2060 km, afin de réaliser une comparaison équitable en choisissant la grille de résolution la plus
2061 grossière, selon les recommandations de Hong and Kanamitsu (2014).

2062 L’ensemble des données de modèle et d’observation sont interpolées sur la grille com-
2063 mune ALP-3i et, pour les données utilisées pour l’analyse de la valeur ajoutée ou pour la
2064 comparaison avec le RCM, elles sont également interpolées sur la grille ALP-11i.

2065 Parmi les différentes méthodes d’interpolation, nous avons choisi l’outil d’interpolation
2066 conservatif de cdo qui est la méthode choisie dans les études récentes avec des CP-RCMs
2067 (Ban et al, 2021; Pichelli et al, 2021).

2068 Il est également nécessaire de prendre en compte un effet de spin-up spatial, c’est-à-dire
2069 une zone aux bordures du domaine à aire limitée qui peut être soumise à des effets de bord
2070 liés à l’imposition des LBCs. Suivant la proposition de Matte et al (2017) et également
2071 utilisé dans Berthou et al (2020) et Fumière et al (2020), nous pouvons estimer ce spin-up

2072 spatial à environ 30 points de grille à enlever à chaque bord du domaine pour la résolution de
2073 2.5 km. Avec des grilles ALP-3i et ALP-11i choisies qui sont plus petites que la zone centrale
2074 physique de CNRM-AROME, nous pouvons considérer que cette zone de spin-up spatial
2075 est éliminée implicitement (les bords nord et l'angle sud-est sont proches des limites du
2076 domaine, mais cela ne devrait pas être problématique compte-tenu du flux atmosphérique
2077 de sud-ouest dominant lors des épisodes méditerranéens).

2078 **2.6.2 Significativité statistique par une méthode de bootstrap**

2079 Une méthode de bootstrap est utilisée pour caractériser la significativité statistique
2080 des biais des modèles par rapport aux observations ou des changements entre les simula-
2081 tions historiques et futures. Elle est utilisée pour plusieurs métriques, que ce soit pour les
2082 percentiles de précipitation extrême ou pour les différentes caractéristiques des systèmes
2083 précipitants.

2084 La méthode utilisée est décrite ci-après pour le cas de recherche de significativité de biais
2085 entre les percentiles de précipitations extrêmes simulés par un modèle et ceux observés.

2086 La première étape consiste à rééchantillonner les ensembles de données d'observation
2087 et de modèle, c'est-à-dire à créer de nouveaux échantillons, par tirage avec remise et pour
2088 des périodes identiques, afin que les ensembles de données rééchantillonnées contiennent les
2089 mêmes conditions météorologiques pour les modèles et pour les observations. Le rééchan-
2090 tillonnage est effectué pour des blocs temporels d'une saison afin d'éviter une surestimation
2091 de la confiance due à des corrélations temporelles entre données.

2092 La deuxième étape consiste à calculer, pour chaque ensemble de données rééchantillon-
2093 nées, les percentiles en chaque point de grille, puis à faire les différences entre les nouveaux
2094 jeux de données simulées et observées, deux à deux pour les mêmes périodes.

2095 Enfin, dans une troisième et dernière étape, pour chaque point de grille, nous calculons
2096 les percentiles 5% et 95% de l'ensemble des différences calculées à la deuxième étape (pour
2097 un niveau de confiance choisi de 90%). Si la valeur zéro est incluse dans l'intervalle des
2098 percentiles 5% et 95%, nous pouvons conclure que la différence entre les percentiles étudiés
2099 pour les deux ensembles de données n'est pas significative au niveau de confiance de 90%.
2100 Dans le cas contraire, le biais est significatif.

2101 Pour des raisons de coût de calcul, le nombre d'échantillons bootstrap est limité à
2102 100. Un test avec 1000 rééchantillons a toutefois été réalisé pour le percentile 99% de
2103 précipitation quotidienne et donne des résultats très proches de ceux obtenus avec 100.

2104 **Chapitre 3**

2105 **Evaluation des CP-RCMs pour la**
2106 **simulation des épisodes**
2107 **méditerranéens**

2108 **Sommaire**

2109	3.1	Evaluation orientée objet du CP-RCM CNRM-AROME pour	
2110		la simulation des épisodes méditerranéens	96
2111			
2112	3.1.1	Résumé de l'article	96
2113	3.1.2	Article publié dans Climate Dynamics	97
2114	3.1.3	Complément pour l'évaluation de CNRM-AROME	135
2115	3.2	Evaluation de l'ensemble de CP-RCMs du FPS Convection	
2116		pour la simulation des épisodes méditerranéens	135
2117	3.2.1	Approche eulérienne	135
2118	3.2.2	Approche lagrangienne	139
2119	3.3	Evaluation multi-tracker de l'ensemble du FPS Convection	
2120		pour la simulation des événements précipitants sur le do-	
2121		main pan-alpin	152
2122	3.3.1	Référence de l'article publié dans Climate Dynamics	152
2123	3.3.2	Résumé de l'article	152
2124	3.4	Synthèse de l'évaluation des CP-RCMs pour la simulation	
2125		des épisodes méditerranéens	155
2126	3.4.1	Points forts	155
2127	3.4.2	Limitations	156
2128	3.4.3	Bilan	157
2129			
2130			
2131			

2132 Ce chapitre est consacré à l'évaluation de la capacité des CP-RCMs à représenter les
2133 épisodes méditerranéens de l'automne avec un focus sur le sud-est de la France, zone où
2134 les observations sont les plus fiables (zone French MED définie dans la Section 2.5.7) et
2135 d'évaluer finement la capacité des modèles à convection explicite à reproduire les différentes
2136 caractéristiques de ces systèmes précipitants. Nous utilisons ici des simulations d'évaluation,
2137 c'est-à-dire forcées par la réanalyse ERA-Interim.

2138 Dans une première partie, sont présentés les résultats de l'évaluation d'une longue si-
2139 mulation du CP-RCM CNRM-AROME (38 ans) qui est comparée à des données observées
2140 de référence, ainsi qu'au RCM CNRM-ALADIN, avec une double approche statistique,
2141 d'abord eulérienne classique, puis lagrangienne avec l'analyse des caractéristiques des sys-
2142 tèmes précipitants. Ces résultats sont présentés sous la forme d'un article publié dans
2143 Climate Dynamics, précédé d'un résumé en français.

2144 Dans une deuxième partie, cette étude s'étend à l'évaluation d'un ensemble de simula-
2145 tions d'évaluation de CP-RCMs du FPS Convection. Après quelques résultats de statistique
2146 eulérienne, l'approche lagrangienne est appliquée à l'ensemble multi-modèle afin d'évaluer
2147 et de comparer l'aptitude des différents CP-RCMs à représenter les épisodes méditerra-
2148 néens de l'automne. Cela permet également de situer le modèle CNRM-AROME parmi les
2149 modèles existants.

2150 Enfin, la troisième partie présente le résumé d'un article de comparaison et d'évaluation
2151 multi-tracker, multi-modèle, auquel j'ai participé, de la mise en place de la méthodologie
2152 à l'exploitation des résultats, et qui a été également publié dans Climate Dynamics. Utili-
2153 sant un ensemble à peu près identique de simulations du FPS Convection sur le domaine
2154 pan-alpin, cette étude compare plusieurs outils de tracking des systèmes précipitants, dont
2155 ma version adaptée de l'outil OSIRIS, et s'intéresse à la capacité de l'ensemble des simu-
2156 lations d'évaluation du FPS Convection à reproduire les caractéristiques des événements
2157 précipitants de la zone pan-alpine.

2158 **3.1 Evaluation orientée objet du CP-RCM CNRM-** 2159 **AROME pour la simulation des épisodes médi-** 2160 **terranéens**

2161 Les résultats sont présentés au travers de l'article suivant, publié dans Climate Dyna-
2162 mics :

2163 Caillaud, C., Somot, S., Alias, A., Bernard-Bouissières, I., Fumière, Q., Laurantin,
2164 O., Seity, Y., Ducrocq, V. (2021) **Modelling Mediterranean heavy precipitation**
2165 **events at climate scale : an object-oriented evaluation of the CNRM-AROME**
2166 **convection-permitting regional climate model**. Clim Dyn 56, 1717–1752.

2167 <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05558-y>

2168 **3.1.1 Résumé de l'article**

2169 Comme cela a été présenté dans l'introduction, la simulation des épisodes méditerra-
2170 néens en climat reste un défi pour la plupart des modèles de climat. Nous l'abordons ici en
2171 effectuant une longue simulation d'évaluation de 38 ans avec le CP-RCM CNRM-AROME,
2172 à une résolution horizontale de 2,5 km, sur le domaine pan-alpin et forcée par la réanalyse
2173 ERA-Interim, avec l'étape intermédiaire du RCM CNRM-ALADIN dans lequel l'option de
2174 pilotage spectral est activée afin d'obtenir les meilleures conditions aux limites au bord du

2175 domaine du CP-RCM. L'évaluation de cette simulation, tout comme l'article, comprend
2176 deux parties.

2177 Dans une première partie, la simulation est évaluée par une approche statistique eu-
2178 lérienne classique grâce à une comparaison avec des données d'observation de référence,
2179 sélectionnées pour leur haute résolution spatiale et temporelle et en particulier COME-
2180 PHORE (1 km, 1 h) sur la France. Cette étude montre que CNRM-AROME est capable de
2181 représenter correctement les précipitations extrêmes de l'automne sur le nord-ouest de la
2182 Méditerranée. La comparaison des percentiles 99% pour l'échelle quotidienne et 99.9% pour
2183 l'échelle horaire montre une bonne représentation des extrêmes en termes de localisation
2184 et d'intensité, encore meilleure au pas de temps horaire. Toutefois, CNRM-AROME tend
2185 à sous-estimer les intensités les plus élevées, supérieures à 200 mm/j et 40 mm/h, respecti-
2186 vement pour les précipitations extrêmes quotidiennes et horaires. Le calcul du nombre de
2187 jours et d'heures dépassant des seuils donnés (respectivement, de 100 à 250 mm/j et de 10
2188 à 50 mm/h) montre également que CNRM-AROME représente correctement la fréquence
2189 et la variabilité interannuelle des épisodes méditerranéens. Une comparaison du CP-RCM
2190 avec le RCM CNRM-ALADIN à 12,5 km pour l'ensemble de ces métriques démontre une
2191 réelle valeur ajoutée du CP-RCM, en particulier à l'échelle horaire, ce qui confirme et étend
2192 les conclusions des études précédentes sur des zones plus restreintes et des périodes plus
2193 courtes.

2194 Le bon comportement de CNRM-AROME pour simuler les épisodes méditerranéens,
2195 en particulier à l'échelle horaire, permet de mettre en place une approche lagrangienne
2196 orientée objet. Dans la deuxième partie de l'article, nous mettons donc en oeuvre l'algo-
2197 rithme OSIRIS de détection et de suivi des systèmes précipitants, appliqué à la fois aux
2198 cumuls horaires de précipitation simulés par le modèle et à ceux observés à haute résolu-
2199 tion, pour vingt saisons d'automne (SOND). En prenant comme objet d'étude les systèmes
2200 précipitants associés aux épisodes méditerranéens français, la capacité de CNRM-AROME
2201 à représenter les principales caractéristiques des systèmes convectifs d'automne est mise
2202 en évidence, en termes non seulement de fréquence (nombre) ou intensité, mais aussi de
2203 surface, durée, vitesse de propagation et sévérité. De plus, le modèle est capable de simu-
2204 ler des événements extrêmes, durables et sévères, proches de ceux observés. Cependant,
2205 CNRM-AROME a tendance à sous-estimer l'intensité des systèmes précipitants les plus
2206 intenses (ceux dont les intensités maximales sont supérieures à 40 mm/h), et également à
2207 surestimer la taille des cellules d'autant plus que leur intensité augmente.

2208 Cette étude démontre donc que, malgré quelques limitations, le CP-RCM CNRM-
2209 AROME est capable de représenter correctement les systèmes précipitants des épisodes
2210 méditerranéens de l'automne. Elle donne confiance dans cet outil de modélisation pour
2211 étudier les épisodes méditerranéens aux échelles climatiques et en particulier dans les pro-
2212 jections futures.

2213 **3.1.2 Article publié dans Climate Dynamics**



Modelling Mediterranean heavy precipitation events at climate scale: an object-oriented evaluation of the CNRM-AROME convection-permitting regional climate model

Cécile Caillaud¹ · Samuel Somot¹ · Antoinette Alias¹ · Isabelle Bernard-Bouissières² · Quentin Fumière³ · Olivier Laurantin⁴ · Yann Seity¹ · Véronique Ducrocq¹

Received: 9 July 2020 / Accepted: 23 November 2020
© The Author(s) 2021, corrected publication 2021

Abstract

Modelling the rare but high-impact Mediterranean Heavy Precipitation Events (HPEs) at climate scale remains a largely open scientific challenge. The issue is addressed here by running a 38-year-long continuous simulation of the CNRM-AROME Convection-Permitting Regional Climate Model (CP-RCM) at a 2.5 km horizontal resolution and over a large pan-Alpine domain. First, the simulation is evaluated through a basic Eulerian statistical approach via a comparison with selected high spatial and temporal resolution observational datasets. Northwestern Mediterranean fall extreme precipitation is correctly represented by CNRM-AROME at a daily scale and even better at an hourly scale, in terms of location, intensity, frequency and interannual variability, despite an underestimation of daily and hourly highest intensities above 200 mm/day and 40 mm/h, respectively. A comparison of the CP-RCM with its forcing convection-parameterised 12.5 km Regional Climate Model (RCM) demonstrates a clear added value for the CP-RCM, confirming previous studies. Secondly, an object-oriented Lagrangian approach is proposed with the implementation of a precipitating system detection and tracking algorithm, applied to the model and the reference COMEPHORE precipitation dataset for twenty fall seasons. Using French Mediterranean HPEs as objects, CNRM-AROME's ability to represent the main characteristics of fall convective systems and tracks is highlighted in terms of number, intensity, area, duration, velocity and severity. Further, the model is able to simulate long-lasting and severe extreme fall events similar to observations. However, it fails to reproduce the precipitating systems and tracks with the highest intensities (maximum intensities above 40 mm/h) well, and the model's tendency to overestimate the cell size increases with intensity.

Keywords Convection-Permitting Regional Climate Model · Mediterranean · Heavy Precipitation Events · Object-oriented · Tracking · CNRM-AROME · COMEPHORE

1 Introduction

The northwestern Mediterranean is affected by Heavy Precipitation Events (HPEs), mainly during the fall season (Ducrocq et al. 2008; Nuissier et al. 2008, 2011). These extreme events, with rainfall amounts greater than 100 mm

recorded in less than a day and often within just a few hours, lead to devastating flash flooding and floods. They have most often been studied in the framework of HyMeX (Hydrological cycle in the Mediterranean eXperiment, Drobinski et al. (2014); Ducrocq et al. (2014)). The occurrence of these events can be explained by several factors:

✉ Cécile Caillaud
cecile.caillaud@meteo.fr

¹ CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, Toulouse, France

² DIROP/PI, Météo-France, Toulouse, France

³ Engie, Brussels, Belgium

⁴ DSO, Météo-France, Toulouse, France

- propitious slow-evolving synoptic-scale situations (Toreti et al. 2010; Nuissier et al. 2011; Ricard et al. 2012): southwesterly and southerly upper-level flows associated with potential vorticity anomalies;
- conditional convective instability and moisture supply through evaporation from the Mediterranean Sea remaining warm after summer and/or low-level moist marine

- flow associated with the synoptic situation (Duffourg and Ducrocq 2011, 2013; Krichak et al. 2015);
- convection triggerings through orography lifting, cold pool (Ducrocq et al. 2008; Bresson et al. 2012), and mesoscale low-level convergence (Ducrocq et al. 2008; Nuisier et al. 2008; Bresson et al. 2009).

The different combination of these ingredients and the slow-evolving nature of the synoptic situation often lead to the formation of quasi-stationary Mesoscale Convective Systems (MCSs), which can cause most significant damage in the Mediterranean region (Hernandez et al. 1998; Ducrocq et al. 2008).

At climate scale, General Circulation Models (GCMs) cannot properly represent Mediterranean HPEs: their coarse spatial resolution, around 150 km, does not allow them to represent topography and mesoscale processes involved in these phenomena correctly (Ruti et al. 2016). Since the late 1980s, the climate modelling community's solution has been to increase the resolution in specific regions and implement Regional Climate Models (RCMs) (Giorgi and Bates 1989; Giorgi 2019) with a current resolution of 50 km up to 12 km. The use of these high-resolution limited area models provides a clear added value compared to 150 km GCMs, especially for precipitation (Déqué and Somot 2008; Ruti et al. 2016; Prein et al. 2016; Fantini et al. 2018). Multi-model studies based on Euro-CORDEX, ENSEMBLES and/or Med-CORDEX simulations also show the larger added value of 12 km RCMs compared to 50 km RCMs (Jacob et al. 2014; Prein et al. 2016; Fantini et al. 2018). In addition, RCMs can locally modify the expected climate change signal compared to GCMs, for example over North America (Di Luca et al. 2013), the Alpine region (Torma et al. 2015; Giorgi et al. 2016) and all of Europe (Rajczak and Schär 2017; Coppola et al. 2020a). The climate change signal can also be modified when the RCM resolution is increased from 50 to 12 km (Jacob et al. 2014; Luu et al. 2018). However, even with a 12 km resolution, deep convection parameterization is recommended, which limits the representation of precipitation patterns and distribution: a shift in the diurnal cycle of precipitation (Hohenegger et al. 2008), overestimation of the frequency of light precipitation, and underestimation of extremes (Déqué and Somot 2008; Fumière et al. 2020). Moreover, the resolution remains too coarse to represent the fine scale processes involved in the triggering of sub-daily precipitation (Berg et al. 2019) and convective phenomena correctly. It therefore limits confidence in the expected evolution of extreme precipitation in the context of climate change (Bony et al. 2015).

Beginning in the late 1990s, limited-area Convection Permitting Models (CPMs) have been developed in Numerical Weather Prediction (NWP) to predict extreme events as HPEs. Combining a spatial resolution of around 1 to 3 km

and high-resolution data assimilation, these models allow a realistic description of convection and the associated triggering mechanisms. They benefit from the implementation of high-resolution topography, a detailed description of surfaces and sophisticated physical parameterisations such as microphysics, turbulence and shallow convection. Moreover, deep convection is explicitly simulated by the model's non-hydrostatic dynamics. Prognostic equations for hydrometeors allow the transport and memory of cloud and precipitation from one time step to the next: advection, development and decay of organised convection such as MCSs are correctly represented by the model dynamics. Therefore, CPMs provide a clear improvement in representing convective phenomena compared to 10 km convection-parameterised models (Ducrocq et al. 2002; Richard et al. 2007; Khodayar et al. 2016).

At the time when CPMs could not be implemented by the climate community due to computing cost limitations, studies mixing dynamical and statistical approaches were used to conduct high-resolution climate studies on extremes, such as Beaulant et al. (2011) or Meredith et al. (2018) for precipitation or Najac et al. (2009) for wind. However, these methods were based on a limited number of cases, and did not yet provide a robust answer to the question of the future evolution of extreme rainfall.

In recent years, as societal needs for predictions of future changes in extreme precipitation coincided with an increase in computing power, the regional climate modelling community began to run Convection Permitting Models for decadal-long simulations, creating a new family of regional models called Convection-Permitting Regional Climate Models (CP-RCMs), with resolutions of around 1 to 3 km. The use of CPMs in climate mode led to the need for studies to validate the models and demonstrate the expected added value of CP-RCMs compared to RCMs (Prein et al. 2015). Indeed, while CPMs have already shown their added value for NWP, which will necessarily benefit the CP-RCMs, the use of these models in climate mode still involves evaluation. For example, in the NWP community, data assimilation has shown its importance in improving the prediction of extreme precipitation events (Gustafsson et al. 2018). In climate mode, the model is initialized only once at the beginning of the simulation period and only boundary conditions are given to the CP-RCM, which can express its own internal variability and biases within its domain. If we focus on precipitation, pioneer evaluation studies over parts of Europe show realistic rainfall characteristics, especially at an hourly time scale with CP-RCMs: the first multi-model study over the eastern part of the Alpine region (Prein et al. 2013) and mono-model studies over the entire Alpine region (Ban et al. 2014; Lind et al. 2016; Reder et al. 2020), Central Europe (Knist et al. 2020), United Kingdom (Kendon et al. 2014), southern part of Germany (Fosser et al. 2015), Belgium (Brisson et al.

2016), Fenno-Scandinavia (Lind et al. 2020) and southeast of France (Fumière et al. 2020). Leutwyler et al. (2017) and Berthou et al. (2020) confirm these results over a larger pan-European domain with, in particular, an improved precipitation diurnal cycle and improved summer and fall hourly precipitation distribution compared to RCMs. European multi-model studies were also carried out over a common pan-Alpine domain within the framework of the CORDEX Flagship Pilot Study (FPS) on Convection program (Coppola et al. 2020b; Ban et al. 2020; Pichelli et al. 2020).

Few studies have been conducted specifically for the fall HPEs in the Mediterranean region using CP-RCMs. In the first European multi-model CP-RCMs intercomparison (Coppola et al. 2020b), one case study focuses on a Mediterranean HPE referred to as HyMeX-IOP16. In Berthou et al. (2020), improvement in the representation of the daily fall extreme precipitation in CP-RCMs compared to RCMs is shown for a ten-year period and also through a detailed case study. For a ten-year period focusing on the Cevennes region, the southern part of the Massif-Central most affected by fall HPEs (cf. Fig. 1), Fumière et al. (2020) use the new French reference hourly and kilometric observational dataset COMEPHORE to demonstrate the added value of CNRM-AROME CP-RCM, compared to CNRM-ALADIN RCM, for daily and hourly precipitation.

To our knowledge, until now, all CP-RCM and RCM studies dedicated to Mediterranean HPEs have focused on local statistics of the surface rainfall without considering them as

organised precipitation systems. However, HPEs are suitable for going beyond standard climate statistics. Indeed, they can be defined as moving objects with specific characteristics, such as life time, area, maximum intensity or velocity. It is now possible to implement object-oriented approaches as done by Prein et al. (2020) in the US to validate the representation of MCSs by a CP-RCM. The use of a precipitating system detection and tracking algorithm will allow us to evaluate the model's ability to reproduce the main characteristics of these events, with the longer-term goal of applying these methods in order to characterise the change in future convective events.

Similarly, until now, studies have been limited to relatively short periods due to calculation limitations for the model's simulations and the limited availability of reliable high temporal and spatial resolution observational datasets. We now have a 38-year-long simulation of the new version of the CNRM-AROME CP-RCM with a 2.5 km resolution over the pan-Alpine domain defined through the CORDEX FPS on Convection program (Coppola et al. 2020b). The new French reference hourly and kilometric observational dataset COMEPHORE has recently been extended to 20 years.

Our study takes advantage of these opportunities. Its main objectives are:

- to confirm the main results of Fumière et al. (2020) over a longer period, a larger domain and with an improved version of the CNRM-AROME CP-RCM by comparing it to observations and to the CNRM-ALADIN RCM.
- to consider French Mediterranean HPEs as objects and apply a precipitating system detection and tracking algorithm in order to evaluate whether the CP-RCM is able to reproduce the main characteristics (duration, area, intensity, severity) of the convective systems observed in COMEPHORE.

Section 2 presents the observational datasets, models, simulation setup and methods used in the study. Section 3 proposes standard climate statistics and a comparison between models and observations, focusing on extreme precipitation and inter-annual variability at daily and hourly time-scales. Section 4 presents the object-oriented approach applied both to CNRM-AROME and COMEPHORE, allowing comparison between the CP-RCM and observations for the main characteristics of the precipitating systems and trajectories. Discussion is provided in Sect. 5 and a conclusion is given in Sect. 6.

2 Datasets and simulations

2.1 Observational precipitation datasets

In our study, we need high-resolution and high-quality observational datasets for three main reasons:

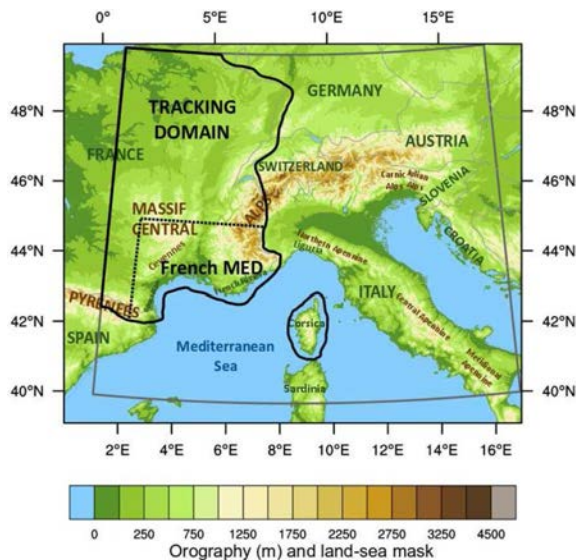


Fig. 1 CNRM-AROME topography in the physical central zone for the pan-Alpine domain. Delimited by grey lines, the regular ALP3 domain is used as the evaluation target grid. The tracking domain is delimited by black lines and the French MED Area by black dotted lines

- we want to evaluate a high spatial and temporal resolution model simulation, i.e. kilometers and hourly, correctly;
- our evaluation study focuses on precipitation, a parameter particularly difficult to estimate because of its significant variability in space and in time;
- we are dealing with extreme rainfall, meaning the tail of the rainfall distribution, which is often poorly represented in observed datasets.

Particular attention must therefore be paid to the choice of reference precipitation observed datasets (Zolina et al. 2014; Prein and Gobiet 2017; Fantini et al. 2018; Kotlarski et al. 2019).

The selected hourly and daily precipitation gridded datasets are described in Table 1.

Hourly precipitation accumulations are based on gridded datasets merging radar and rain gauge observations over France (COMEPHORE), Germany (RADKLIM) and Switzerland (RDISAGGH), and only on rain gauge observations over Italy (GRIPHO).

Daily precipitation accumulations are based on the available hourly data from COMEPHORE, RADKLIM and GRIPHO over France, Germany and Italy. To extend the covered area, we also use the APGD-EURO4M daily dataset on the Pan-Alps domain. Over Switzerland, where RDISAGGH is only available for a period of 8 years, we prefer the daily APGD-EURO4M with a longer period available.

As COMEPHORE is the reference for our extreme precipitation evaluation study over the French Mediterranean in Sects. 3.3 and 4, we propose a detailed description in appendix A.

2.2 Models and simulations

To evaluate Regional Climate Models, the current practice is to run a so-called “evaluation run” in which the model is driven by “perfect” lateral boundary conditions, that is to say reanalysis. In order to evaluate the CP-RCM, we perform a long past simulation of CNRM-AROME with a horizontal resolution of 2.5 km, driven by the 80 km ERA-Interim global reanalysis (Dee et al. 2011), described in Fig. 2. In order to limit the resolution jump (Laprise et al. 2008; Prein et al. 2015; Matte et al. 2016, 2017), a two-tier forcing strategy is chosen: the intermediate step is the CNRM-ALADIN RCM with a 12.5 km horizontal resolution.

2.2.1 CNRM-ALADIN RCM

CNRM-ALADIN (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational) is a Regional Climate Model (RCM) that has been used at CNRM since the early 2000s (Spiridonov et al. 2005; Déqué and Somot 2008; Radu et al. 2008; Sanchez-Gomez et al. 2009; Colin et al. 2010).

In this study, CNRM-ALADIN presents a 12.5 km horizontal resolution and 91 vertical levels from 10 m to 1 hPa. The time step is 450s. The CNRM-ALADIN simulation is driven by the 80km global reanalysis ERA-Interim every 6 hours, on a Med-CORDEX domain (Ruti et al. 2016). A spectral nudging technique (von Storch et al. 2000; Radu et al. 2008) is applied to CNRM-ALADIN (Colin et al. 2010; Herrmann et al. 2011) in order to impose large-scale conditions given as close as possible to reality on the CP-RCM.

CNRM-ALADIN is a bi-spectral, hydrostatic limited-area RCM with a semi-Lagrangian advection scheme and

Table 1 The main characteristics of the observational datasets used in the study

Observational dataset	Area	Available period	Frequency	Horizontal resolution	Type of observation	Period and frequency in our study	Provider	References
COMEPHORE	France	1997–2016	Hourly	1 km	Rain gauges +radar	1997–2016 Hourly-Daily	Meteo-France	Tabary et al. (2012) Fumière et al. (2020)
RDISAGGH	Switzerland	2003–2010	Hourly	1km	Rain gauges +radar	2003–2010 Hourly	MeteoSwiss	Wüest et al. (2010)
RADKLIM	Germany	2001–2018	Hourly	1km	Rain gauges +radar	2001–2018 Hourly-Daily	DWD (Deutscher Wetterdienst)	Winterrath et al. (2017)
GRIPHO	Italy	2001–2016	Hourly	3km	Rain gauges	2001–2016 Hourly-Daily	CETEMPS Univ. of L'Aquila (Italy)	Fantini (2019)
APGD-EURO4M	Pan-Alps	1971–2008	Daily	5km	Rain gauges	1981–2008 Daily	MeteoSwiss EURO4M project	Isotta et al. (2014)

a semi-implicit time discretisation. This model requires a parameterisation of deep convection. While Fumière et al. (2020) used CNRM-ALADIN v5, here we use the recent version v6.2 of CNRM-ALADIN (Daniel et al. 2019; Nabat et al. 2020) with a new convection scheme including dry, shallow and deep convection (Piriou et al. 2007; Guérémy 2011). The previous deep convection scheme was the mass-flux scheme based on a moisture convergence closure (Bougeault 1985): deep convection with condensation and precipitating following the rule "everything that condenses precipitates". The new PCMT scheme (Prognostic Condensates Microphysics and Transport) allows convection to be represented with or without condensation, precipitating or not, with a closure in relaxation of the Convective Available Potential Energy (CAPE).

In the following, CNRM-ALADIN will refer to CNRM-ALADIN v6.2.

2.2.2 CNRM-AROME CP-RCM

CNRM-AROME is the Convection-Permitting Regional Climate Model (CP-RCM) that has been used at CNRM since 2014 (Déqué et al. 2016; Coppola et al. 2020b; Fumière et al. 2020; Ban et al. 2020; Pichelli et al. 2020). The CNRM-AROME model is based on the nonhydrostatic, convective-scale, limited-area model AROME (Applications de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Echelle) used for National Weather Prediction in Meteo-France since 2008 (Seity et al. 2011; Brousseau et al. 2016). The AROME model is also used in climate mode by the HARMONIE-CLIMATE community (Belušić et al. 2020; Lind et al. 2020).

In this study, CNRM-AROME presents a horizontal resolution of 2.5 km, which was the resolution used in NWP AROME from the beginning of its operational use until April 2015. The number of vertical levels is 60, with hybrid coordinates levels (Seity et al. 2011) from 10 m to about 1 hPa and 21 levels under 2000 m, which allows a good description of the lower layers of the atmosphere. The time step is 60 seconds.

The version of the CNRM-AROME model used in this study (and also in Coppola et al. (2020b), Ban et al. (2020) and Pichelli et al. (2020)) is related to the cycle 41t1 of the NWP AROME (Termonia et al. 2018) in operational use at Meteo-France between December 2015 and December 2017. The version of CNRM-AROME used in Déqué et al. (2016), Fumière et al. (2020), Belušić et al. (2020) and Lind et al. (2020) is related to cycle 38.

The dynamical core is the non-hydrostatic ALADIN bispectral core (Bénaud et al. 2010) with a semi-Lagrangian advection scheme and a semi-implicit time discretisation. With high-resolution and non-hydrostatic dynamics, deep

convection is no longer parameterised, but sub-grid shallow convection still requires parameterisation.

With the exception of the radiation scheme, most of the physical parameterisations come from the Meso-NH research model (Lafore et al. 1998; Lac et al. 2018) and are presented in Table 2.

The land surface modelling system is the SURFEX 7.3 platform (Masson et al. 2013). Each model grid box is split into four tiles and a different parameterisation is activated for each tile:

- land: ISBA-3L, with three vertical layers inside the ground (Noilhan and Planton 1989) and D95 snow model (Douville et al. 1995);
- town: TEB, town energy budget (Masson 2000);
- sea: COARE3 (Fairall et al. 2003);
- inland waters, meaning lakes and rivers: Charnock formulation (Charnock 1955).

Due to a first vertical layer at 10 m, the Surface Boundary Layer scheme CANOPY-SBL (Masson and Seity 2009) is activated. This parameterisation implements additional prognostic atmospheric layers between the ground and the lowest level of the atmospheric model and makes it possible to explicitly calculate the 2 m temperature and 10 m wind.

Physiographic data is based on the global ECOCLIMAP I database (Masson et al. 2003) at 1 km resolution.

The CNRM-AROME41t1 version used in climate mode in this study is very close to the NWP version. The only model differences are:

- the parameterisation of the turbulence fluxes above the sea, ECUME (Belamari and Pirani 2007), is replaced by the COARE3 scheme;
- the relaxation zone where the atmosphere lateral boundary conditions are imposed is extended from 8 to 21 grid points to avoid losing information from the driving model when entering the CP-RCM domain.

The main modifications between the cycle 38 used in Fumière et al. (2020) and the cycle 41 used in this study are the following:

- a new database for orography with higher resolution: the GTOPO30 with 1 km resolution (Survey 1993) is replaced by the GMTED2010 with 250 m resolution (Carabajal et al. 2011);
- a new version of SURFEX: from V7.2 to V7.3;
- some minor modifications in the dynamics in order to improve the numerical cost;

Table 2 CNRM-AROME physical parameterisations

Parameterisation	Scheme	References
<i>Turbulence</i>	CBR scheme based on a prognostic equation of TKE	Cuxart et al. (2000)
<i>Shallow convection</i>	PMMC09 scheme based on the eddy diffusivity mass flux (EDMF) approach	Bougeault and Lacarrere (1989) Pergaud et al. (2009)
<i>Clouds</i>	Statistical cloud scheme	Bechtold et al. (1995)
<i>Microphysics and sedimentation</i>	ICE3, one-moment microphysics prognostic scheme with five prognostic variables of water condensates (cloud droplets, rain, ice crystals, snow and graupel). Hail is not activated.	Pinty and Jabouille (1998) Lascaux et al. (2006)
<i>Radiation</i>	Sedimentation scheme Version of the ECMWF radiation parameterisations (RRTMG 16 bands for longwave and FMR 6 bands for shortwave)	Bouteloup et al. (2011) Iacono et al. (2008) Mlawer et al. (1997) Fouquart and Bonnel (1980) Morcrette (2001)

- two physical parameterisation modifications: the increase in the self-conversion threshold of primary ice crystals to snow and the addition of orographic shadowing and slope parameterisations (Senkova et al. 2007);
- the main modification is the implementation of the COMAD scheme (Malardel and Ricard 2015). Indeed, in the vicinity of convective clouds, AROME had the general tendency to produce unrealistic divergent winds at the edges of the cold outflows generated by the precipitation evaporation. More conservative semi-Lagrangian horizontal weights were proposed in order to take into account the deformation of air parcels along each direction. Through the use of these new weights, the problem of “grid-point storms” was corrected.

In Fumière (2019), a comparison between the two versions of the model (cycle 38 and 41) showed an improvement in the representation of fall rainfall in the southeast of France with CNRM-AROME41t1 (not shown).

In the following, CNRM-AROME will refer to CNRM-AROME41t1.

2.2.3 Evaluation simulation setup

We performed a 38-year CNRM-AROME evaluation simulation from 1981 to 2018 which is, to our knowledge, the longest run ever performed at 2.5 km with a climate model. It is worth mentioning that the simulation was technically carried out in two time slices: from 1997 to 2018 with a 3-year spin-up period (1994–1996) and then extended from 1981 to 1996 with a 2-year spin-up period (1979–1980). Thanks to

the spin-up strategy and the limited-area model framework, however, we consider the break to be very limited.

The CNRM-AROME evaluation simulation is presented in Fig. 2.

Domain

The limited-area CP-RCM domain is the common pan-Alpine domain (cf. Fig. 1) defined through the CORDEX FPS on Convection program (Coppola et al. 2020b). The 2.5 km CNRM-AROME computational domain consists of 345600 grid points (640 points of longitude and 540 points of latitude) with a conformal-Lambert projection. On the north and east sides, the extension zone (E zone) where artificial periodic extensions of the spectral fields are inserted contains 11 grid points. On each side of the domain, the intermediate zone (I zone) where the lateral boundary conditions are imposed by a relaxation comprises 21 grid points. The physical central zone (C zone) consists of 587×487 points, meaning around $1500 \text{ km} \times 1200 \text{ km}$ at 2.5 km resolution. On the Meteo-France supercomputer, 5 days are needed to run one year of CNRM-AROME on the pan-Alpine domain (142kh TEI = number of cores \times number of hours per simulated year), which is 16 times longer than for a CNRM-ALADIN 12.5 km simulation on the Med-CORDEX domain.

Initial conditions

The initial atmospheric and surface initial conditions are interpolated fields from the CNRM-ALADIN RCM simulation and are given to the CNRM-AROME CP-RCM over the entire pan-Alpine domain, only once at the beginning of the simulation.

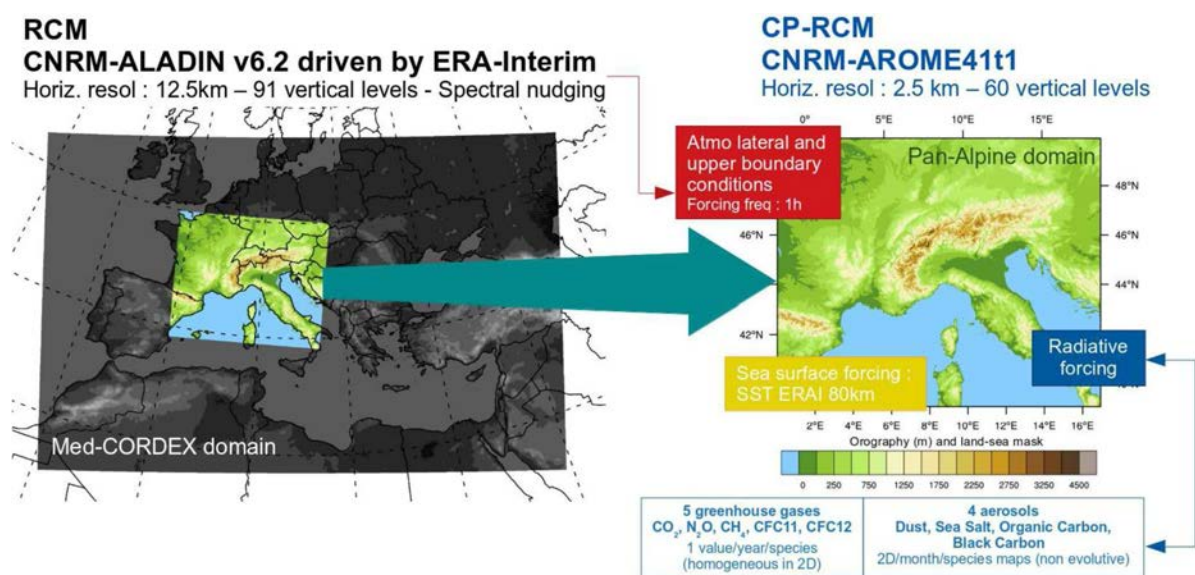


Fig. 2 CNRM-AROME evaluation simulation setup

Lateral and upper boundary conditions

CNRM-ALADIN driven by ERA-Interim reanalysis gives the lateral boundary conditions to the CNRM-AROME CP-RCM every hour. Upper boundary conditions are also given by the RCM every hour for levels between 15 and 20 km with weak relaxation coefficients and only for long waves, applied to wind divergence, wind vorticity and temperature all over the CP-RCM domain. These upper boundary conditions are added to avoid numerical stability problems linked to a low number of vertical levels in the high troposphere and stratosphere.

Surface forcing

For the surface boundary conditions, we impose the Sea Surface Temperatures (SSTs) from interpolated monthly ERA-Interim SSTs (around 80 km) as recommended in the CORDEX-FPS on Convection simulation protocol. The Mediterranean sea plays an important role in supplying moisture and convective instability during HPEs and in fine-scale interactions occurring between the low-level atmosphere and the ocean mixed layer (Lebeaupin Brossier et al. 2008; Rainaud et al. 2017; Bouin and Lebeaupin Brossier 2020). Higher resolution SSTs than the ERAinterim ones could provide a better representation of the sea surface conditions with finer-scale patterns. A step forward to take advantage of a higher resolution SST would be to have a high-resolution high-frequency coupling between atmosphere and ocean to represent the complex air-sea interactions, but is not yet affordable in long climate simulations.

Radiative forcing

In addition to water vapour directly simulated by the model, the concentrations of five greenhouse gases are imposed: CO_2 , N_2O , CH_4 , CFC11, CFC12 with one value per year and per species, homogeneous in the spatial dimension. The values come from observations before 2005 and from the RCP4.5 scenario afterwards (Moss et al. 2010). As the differences in greenhouse gases radiative impacts between observations (Friedlingstein et al. 2019) and RCP4.5 scenario are very small, the use of RCP4.5 concentrations after 2005 is not expected to have significant impacts on the results. The Nabat et al. (2013) aerosols dataset, a mixture of remote sensing and model data, provides monthly evolutive two-dimension maps for dust, sea salt, organic carbon and black carbon. Due to an error in the preparation of the simulation, the sulfate forcing is missing in this simulation. Moreover, the optical properties of the aerosols have not been updated as advised in table 6 of Nabat et al. (2013).

2.3 Methods

2.3.1 Common grids and interpolation method

Model evaluation requires the choice of common grids where comparisons are performed. The first grid is the common regular 0.0275° resolution ($\approx 3\text{km}$) ALP3 grid which is the evaluation target grid defined in the framework of the CORDEX FPS on Convection program (cf. Fig. 1). In

addition, for a fair comparison between the 2.5 km CP-RCM and the 12.5 km RCM, and following Hong and Kanamitsu (2014), the comparisons must also be made on the coarsest resolution between compared datasets. The second grid is the pan-Alpine part of the common regular Euro-CORDEX Europe high-resolution grid, EUR-11i (0.125°, i.e. around 12 km), called ALP11.

All model and observational datasets are interpolated on these common grids. Among the different ways to interpolate horizontal fields, we select the cdo first order conservative remapping, a common method chosen in recent studies (Ban et al. 2020; Pichelli et al. 2020).

Spatial spin-up effect that means zones of the domain that may be subject to boundary effects should also be taken into account in limited-area modelling. Following Matte et al. (2017), Berthou et al. (2020) and Fumière et al. (2020), we estimate it to around 30 grid points for each border of the domain for the 2.5 km resolution. The chosen ALP3 or ALP11 evaluation target grids allow us to implicitly remove the required spatial spin-up zone from the CNRM-AROME computing pan-Alpine domain.

2.3.2 Composite of datasets

As we can see in Fig. 3, the lengths of the available periods of the different observational datasets are not homogeneous; some are constrained by the availability of radar archives, and others are limited by databases not extended after the end of production projects. But extreme precipitation events in the northwestern Mediterranean present high temporal variability, and the chosen study period might strongly impact the calculation of extremes.

Therefore, when calculating differences between models and observations, we choose only common periods. Further, in order to take full advantage of the databases and simulations, we use common time periods that can be spatially

different. The figures will be composites with various time period depending on the datasets used (cf. Fig. 4).

2.3.3 Evaluation indexes

Percentiles

In Sect. 3, percentiles are calculated for each model and observational datasets over each common period. The calculation takes into account all-day precipitation (both dry and wet-days) following Schär et al. (2016).

Interpolation on common ALP3 and ALP11 grids is performed before percentile computation in order to compare models and observation percentiles. For each grid point, absolute differences are then calculated and preferred to relative differences in order to highlight the areas with high percentiles values.

CNRM-AROME and observations are compared on both 3 and 12 km grids. When considering CNRM-ALADIN, data are interpolated only on the ALP11 grid for a fair comparison.

A bootstrapping method (described in appendix B1) is used to validate the statistical significance of model bias differences at the 90% confidence level. On the figures representing percentiles differences on the 12 km grid (cf. Fig. 6de and 8de), only data with significant differences between model and observations are plotted.

Added value

A spatial added value index of the CNRM-AROME CP-RCM compared to CNRM-ALADIN RCM (cf. Fig. 6f and 8f) is computed. As for the calculation of differences, the absolute added value is preferred in order to highlight the areas with high percentile values. The added value index is defined on each grid point as the difference of the absolute values of the differences between the RCM and observations on the one hand and the CP-RCM and observations on the other hand, which means that for the Q studied statistics:

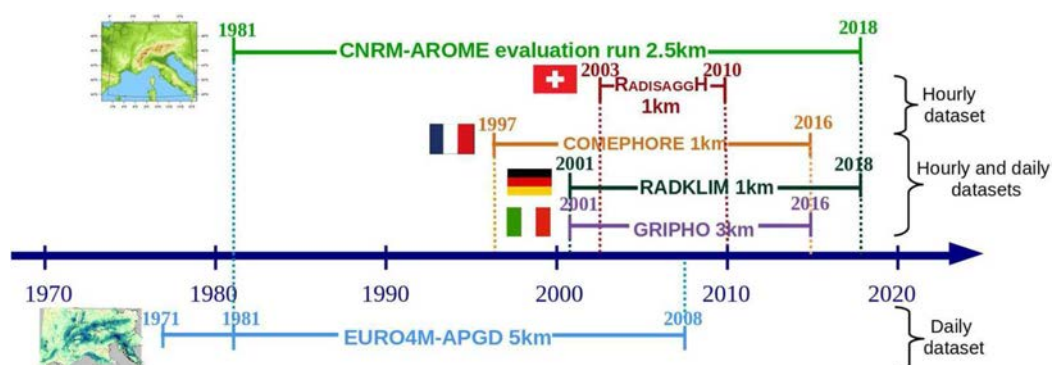


Fig. 3 The available periods of the different precipitation observational datasets used for hourly and daily precipitation evaluation, compared to the period of the model evaluation simulation



Fig. 4 Regular ALP3 or ALP11 domains used as evaluation target grids in grey and composite of observational datasets at daily time scale on the left and hourly time scale on the right with the available period for each dataset. Orography (500 m and 1000 m) is plotted in brown lines

$$\text{AddedValue} = |Q_{RCM} - Q_{Observation}| - |Q_{CPRCM} - Q_{Observation}| \quad (1)$$

A positive added value index means that the CP-RCM bias is smaller than that of the RCM: we can therefore conclude that the CP-RCM behaves better than the RCM for the studied statistics. A negative added value index corresponds to a larger bias for the CP-RCM with respect to RCM.

2.3.4 Definition of the French MED area

To compute statistics on French Mediterranean HPEs for both standard climate statistics and precipitating system detection and tracking, a specific area is defined, called French MED (cf. Fig. 1). Following Ribes et al. (2019), we computed the annual maximum 1-day rainfall RX1d for each grid point for the 20 years of the COMEPHORE observational dataset. Then we selected the rectangular limits of the area where the all-period average of RX1d is higher than 60 mm, the threshold used in Ribes et al. (2019) to select stations affected by Mediterranean events. As the COMEPHORE data does not cover the sea, the grid points over the sea are also removed for the model dataset. We excluded Corsica from this study area because of its specific orography, the difficulty of capturing trajectories on this small mountainous area of land, and the fact that COMEPHORE is not able to represent precipitation correctly on a large part of the island (cf. Fig. 16 in appendix A). The French MED area is, for example, used in Figs. 9 or 13.

2.3.5 Precipitating system detection and tracking algorithm

The object-oriented approach used here to study HPEs involves the implementation of a precipitating system detection and tracking algorithm. The chosen method developed

at CNRM and already applied in precipitation nowcasting and for AROME evaluation follows Morel and Senesi (2002a).

For this study, the tool is applied to the 1-h accumulated precipitation field, instead of the 5-min radar reflectivities used in its nowcasting version. This is possible thanks to the specific characteristics of Mediterranean HPEs, which are organised convective systems with a much longer lifetime than those of ordinary cells.

The method can be summarised as follows:

- Step 1: interpolation and smoothing;
- Step 2: detection of the precipitating systems every hour with a minimum surface of 20 km² and seven intensity thresholds (2, 5, 10, 15, 20, 25 and 30 mm/h);
- Step 3: tracking of system trajectories by indentifying links between systems at different time steps according to overlapping and correlation conditions;
- Step 4: diagnostics.

A further description of the algorithm can be found in appendix C and Fig. 18.

Severity index

To characterise the most severe tracks, we introduce an index with a hydrological impact point of view, called severity index (cf. Fig. 14f). Considering the track of a cell exceeding a given intensity threshold, the severity index is defined as the sum, over the whole lifetime of the cell, of the product of mean intensity and area at each time step with a weight coefficient that takes into account the effect of the cell's moving velocity. The severity index therefore corresponds to the amount of surface precipitation during the track of a given precipitating system weighted by the system velocity. Indeed, for convective systems of comparable precipitation intensity, the given areas concerned by the systems will be affected by higher rainfall accumulations if the system moves more slowly or is quasi-stationary (Ducrocq et al. 2008; Bresson et al. 2012). Thanks to the introduction of

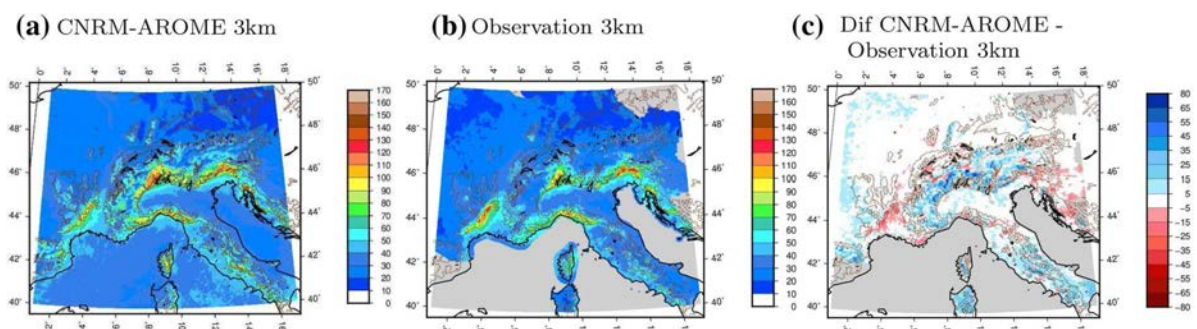


Fig. 5 Spatial distribution of the 99th percentile for daily precipitation (mm/d) during an extended fall (SOND) for **a** CNRM-AROME and **b** observation on the 3 km grid. Figure (c) presents absolute dif-

ferences between model and observation (mm/day). On all figures, orography (500 m and 1000 m) is plotted in brown lines

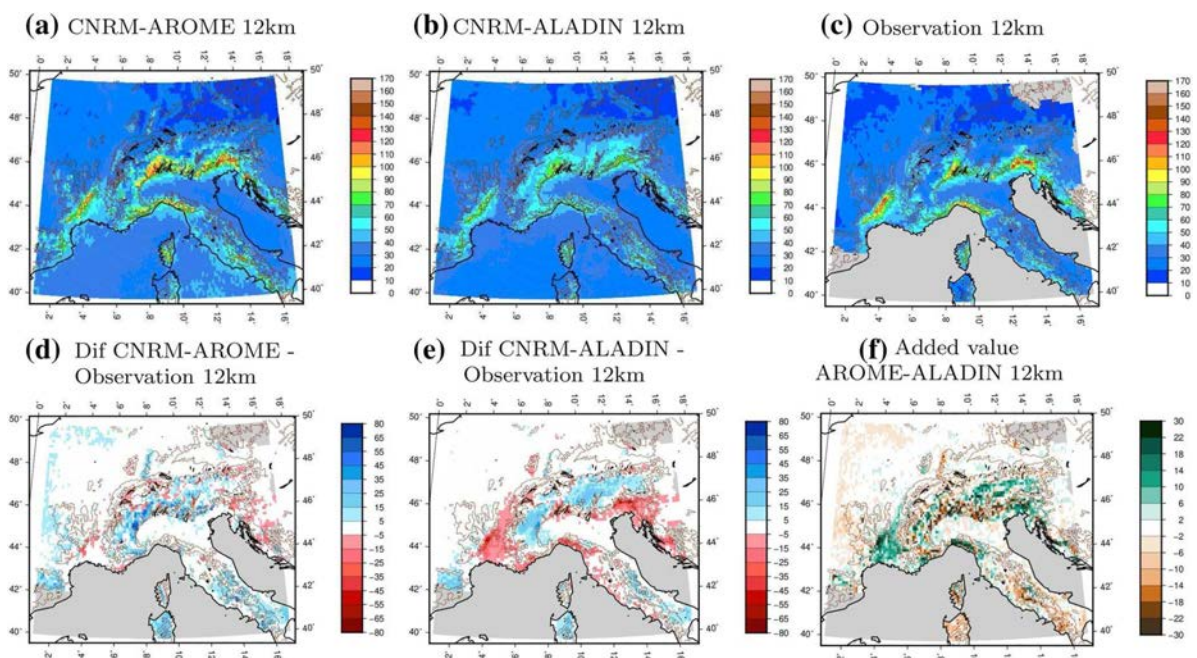


Fig. 6 Spatial distribution of the 99th percentile for daily precipitation (mm/d) during an extended fall (SOND) for **a** CNRM-AROME, **b** CNRM-ALADIN and **c** observation for the 12 km grid. The second line presents **d**, **e** absolute differences between models and observation (mm/day) and **f** the added value of CNRM-AROME

compared to CNRM-ALADIN (mm/day). Differences are plotted only when significant at the confidence level of 90% (bootstrapping method). Added value is plotted in green if CNRM-AROME better than CNRM-ALADIN, in brown otherwise. On all figures, orography (500 m and 1000 m) is plotted in brown lines

a coefficient inversely proportional to the system horizontal moving velocity, a quasi-stationary system will have an higher severity index than the same system moving fast. Therefore, the formula of the severity index is as follows:

$$severity = \sum_{duration} \alpha \times I_{mean} \times A \times \frac{V_{max}}{V} \times dt \quad (2)$$

with *severity* in m^3 , $\alpha = 1/1000$ coefficient to convert $mm.km^2$ to m^3 , I_{mean} the mean intensity of each cell of the track in mm/h , A its area in km^2 , V its moving velocity in m/s , $V_{max} = 35m/s$, $dt = 3600s$.

The V_{max} value is set to 35m/s, consistent with the maximum velocity observed in COMEPHORE during the twenty fall seasons (1997–2016) and with convective systems' motion speeds (Johnson and Ciesielski 2020). For the

numerical implementation of the severity index and within the framework of the study with a horizontal resolution of 3 km, the velocity V is taken equal to $\max(0.4, V)$ (with $0.4 \text{ m/s} = 1.5 \text{ km/h}$ corresponding to the minimum velocity for a system to leave the 3 km grid point within an hourly time step).

3 Climate statistics with a focus on extreme precipitation

We first focus on standard climate statistics: extreme precipitation can be studied through high percentiles at daily and hourly time scales or the definition of events exceeding daily and hourly thresholds. The studied period is an extended fall season (from September to December), the period in which most of the heavy precipitation events occur in the Mediterranean region (Ricard et al. 2012).

Percentiles are presented on the 3 km grid for CNRM-AROME and observations, then on the 12 km grid for CNRM-AROME, CNRM-ALADIN and observations.

3.1 Daily precipitation statistics

The 99th percentile for daily precipitation is a good representation of daily extreme precipitation. On average, for a period of 20 years and our 4-month selection, it corresponds to the daily precipitation amount exceeded about once per year for each grid point.

As we can see on the observed 99th percentile figure (cf. Fig. 5b), in the fall season, daily extreme precipitation is focused on areas affected by Mediterranean HPEs and more specifically the foothills of the Massif Central, Alps and Northern Apennines subject to southwesterly to southerly flows (Nuissier et al. 2011). The four regions most affected are the Cevennes in France, the Swiss Alps, the Carnic and Julian Alps between Italy, Austria and Slovenia and the Italian Liguria in the foothills of the Northern Apennines, with amounts exceeding 100 mm/day. We also find heavy precipitation amounts along the coasts, especially on the French Riviera and Croatian coasts, and in Corsica.

When considering CNRM-AROME on the 3 km grid and comparing with observations (cf. Fig. 5), we can observe a good representation of daily extremes by the model, with well localised small-scale features and maxima of comparable intensity. For instance, values above 120 mm/day are present in both CP-RCM and observations in the Cevennes region. The figure of differences between CNRM-AROME and observations shows a good match between the CP-RCM and observations. We note, however, a small overestimation inland and a small underestimation in the foothills of the Cevennes or in Croatia. Over mountains, the signal is noisier: the overall tendency of overestimation by the model

can be limited by a possible observational rainfall underestimation in mountainous areas. Therefore, it is difficult to draw conclusions for this location due to observation discrepancies. On the 12 km grid (cf. Fig. 6acd), similar comments can be made when comparing the CP-RCM and observations. The statistical significance of the differences between model and observations is added using the bootstrapping method defined in Sect. 2.3.3: the differences are plotted only when significant at the confidence level of 90%. The underestimation of CNRM-AROME in the foothills of the Cevennes is spatially more limited when considering significance.

Analysing the figures with the CNRM-ALADIN RCM (cf. Fig. 6bce) with a native resolution of 12.5 km, as expected, the daily 99th percentile is smoother, with lower values. A clear underestimation is observed in the Cevennes region and in a large part of the plains of Provence, French Riviera, Liguria and in the foothills of parts of the Alps such as the Carnic and Julian Alps. When comparing the differences between CNRM-AROME and observations and CNRM-ALADIN and observations and when calculating added value defined in Sect. 2.3.3, we can observe a strong added value of the Convection-Permitting model compared to the deep convection parameterised model where the highest values of quantiles are observed; that is in the foothills and near the coasts of the Mediterranean region. The signal is noisier in the mountains, where it is even more difficult to draw conclusions due to observational discrepancy. The added value of the CP-RCM on fall extreme precipitation confirms the results of Fumière et al. (2020) on the Cevennes and extends it to the northwestern Mediterranean.

At the daily time scale, we also calculate mean precipitation and the number of wet days (days with precipitation above 1 mm/d) (presented in appendix D, Fig. 19 and 20). Less expected than for the 99th percentile, the use of CP-RCM allows an improvement of fall precipitation climatology with a better representation of mean precipitation and number of wet days, clearly overestimated over mountains by CNRM-ALADIN and closer to observations with CNRM-AROME.

3.2 Hourly extreme precipitation statistics

At the hourly time scale, we calculate the 99.9th percentile. On average, for a period of 20 years and our 4-month selection, it corresponds to the hourly precipitation amount exceeded about three times per year for each grid point.

On the observed fall hourly 99.9th percentile figure (cf. Fig. 7b), the list of regions most affected by heavy precipitation differs slightly from the list of those observed at the daily time scale. But, in the southeast of France, we observe an extension of the highest values from the Cevennes foothills to the plains, with maxima exceeding

20 mm/h. The Italian Ligurian coast, the eastern part of Corsica and the foothills of the Carnic and Julian Alps also stand out with the same range of values. Unfortunately, there is a lack of hourly observed data for Croatia; otherwise, we would be able to extend the study to another area which is also heavily affected by HPEs (Ivusic et al. 2020).

When focusing on the CNRM-AROME 99.9th percentile (cf. Fig. 7 on the 3 km grid and Fig. 8ac on the 12 km grid), we observe an overall good representation of hourly extremes by the model, with similar maxima locations and similar ranges of high values. In the comparison between model and observations, we can however conclude that CNRM-AROME has a tendency to overestimate the

hourly heavy precipitation (except local underestimation in eastern Switzerland). This tendency is present mainly over regions where low values of quantiles are observed. If we focus on regions with high quantile values (for example, the Cevennes foothills and the French Riviera in France or Liguria in Italy), CNRM-AROME is able to represent the 99.9th percentile correctly, close to observations. The slight underestimation observed in Fig. 7c is not significant when using the bootstrapping method on data on the 12 km grid (cf. Fig. 8d).

When comparing CNRM-AROME and CNRM-ALADIN (cf. Fig. 8), we can draw similar conclusions as for the daily 99th percentile, but with a larger added value

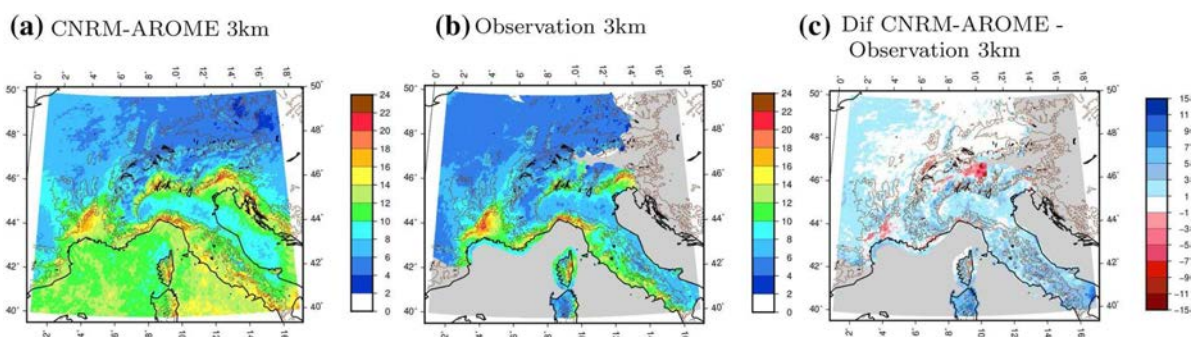


Fig. 7 Same as Fig. 5 but for the 99.9th percentile for hourly precipitation (mm/h)

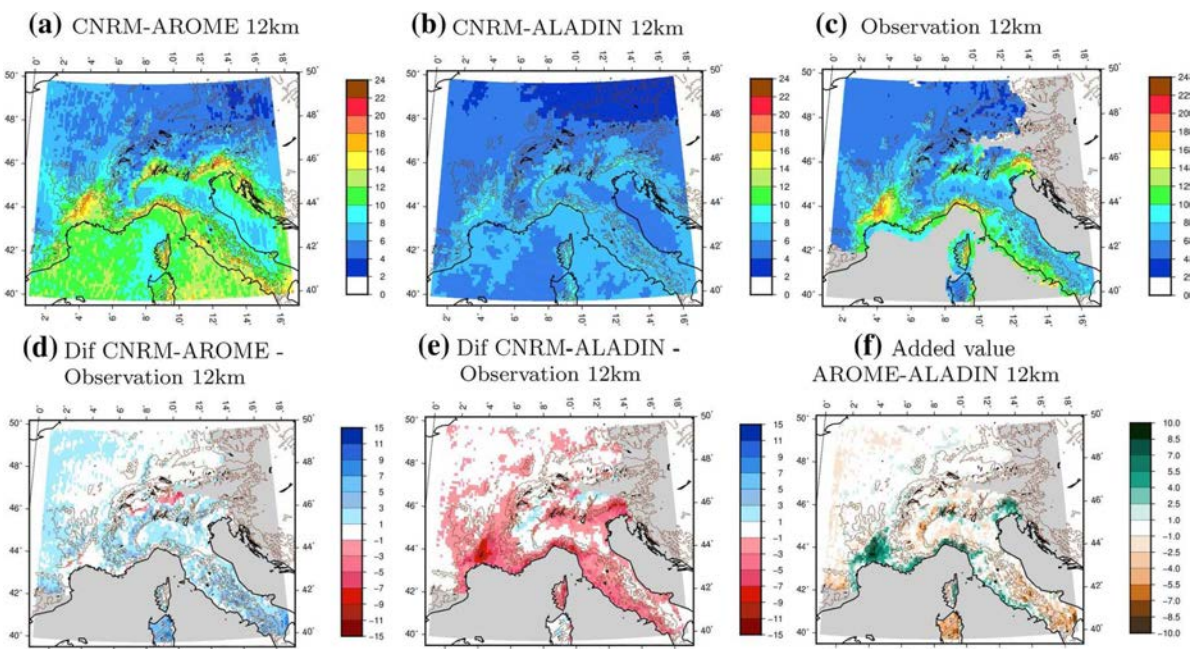


Fig. 8 Same as Fig. 6 but for the 99.9th percentile for hourly precipitation (mm/h)

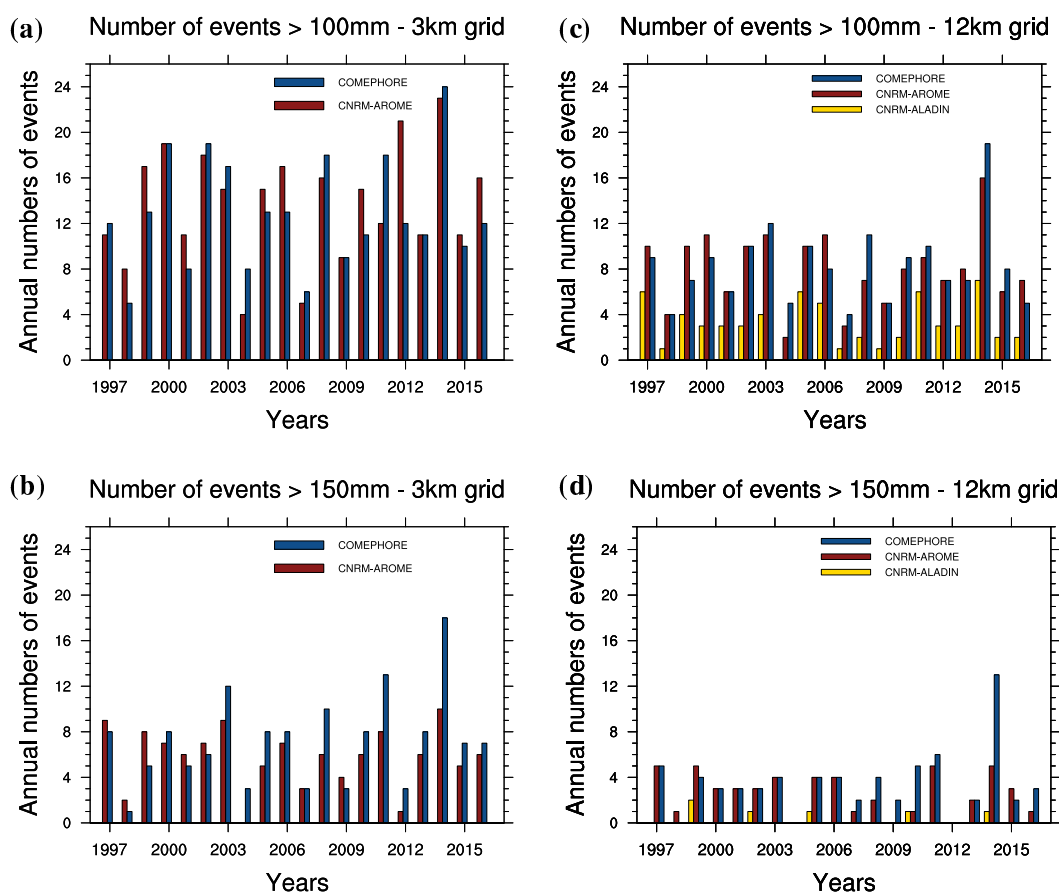


Fig. 9 Variation of the annual numbers of daily events exceeding the 100 mm and 150 mm/day thresholds in the French MED area during the extended fall (SOND) between 1997 and 2016 for COMEPHORE

in blue and CNRM-AROME in red on the 3 km grid (a, b) and for COMEPHORE in blue, CNRM-AROME in red and CNRM-ALADIN in yellow, on the 12 km grid (c, d)

of the CP-RCM compared to the RCM. Indeed, the RCM seems unable to reproduce realistic hourly high precipitation. While CNRM-ALADIN sets maxima locations quite well inland, we notice a frequent shift towards areas with high relief while the heaviest rains are observed in the foothills or the plains (of the Cevennes or the Carnic and Julian Alps, for example). In terms of intensity, CNRM-ALADIN clearly underestimates hourly quantile values with around 10 mm/h maxima compared to the observed 20 mm/h: the convection-parameterised model fails to correctly reproduce the highest intensity maxima.

Over the sea, we can also observe a real difference in behaviour between CNRM-AROME and CNRM-ALADIN with a much more active CP-RCM. Active sub-daily convection often takes place over the Mediterranean Sea in the fall season, but CNRM-ALADIN is unable to simulate strong hourly convective rainfall, which is all the more true over the sea, far from topographic lifting. This difference of precipitation intensities between the two models

over sea, away from orographic or coastal effects, shows that the CP-RCM is able to modify the representation of sub-daily convective phenomena, which is also shown in Berthou et al. (2020).

3.3 Interannual variability of events exceeding thresholds

After considering rainfall intensities for a given frequency, we now focus on frequencies of given intensity thresholds. We consider events defined by the rainfall amount exceeding thresholds over a defined period and area. For this study, we follow Ribes et al. (2019), who calculated the annual numbers of daily events in order to characterise the evolution of observed extreme precipitation in the southeast of France. The chosen area is therefore the French MED area (described in Sect. 2.3.4) defined following Ribes

et al. (2019) on the basis of the 20 years of COMEPHORE observed data.

This specific interannual evolution study is possible thanks to the use of both the ERA-Interim reanalysis driving and spectral nudging in the CNRM-ALADIN simulation: propitious synoptic scales for Mediterranean events are well represented in the RCM, and it also benefits the CP-RCM without spectral nudging but with a smaller domain. This allows us to compare year-by-year models and observations.

Daily French Mediterranean events

First, we focus on the daily time scale and count the annual numbers of days where at least one grid point exceeds given thresholds in the French MED area for an extended fall season, both for CNRM-AROME, CNRM-ALADIN and COMEPHORE. The common period is 1997–2016. We performed this calculation for thresholds from 100 to 250 mm, every 50 mm on a common 3 km grid for CNRM-AROME and COMEPHORE and on a 12 km grid when considering CNRM-ALADIN.

We present the interannual variations of the number of events for only the 100 and 150 mm/day thresholds in Fig. 9. For all thresholds, the mean annual numbers of events are presented in Table 3, as well as interannual correlations between models and observations. The tests used to validate the statistical significance of mean differences and correlation are described in appendix B.

If we focus on Fig. 9ab after interpolation on the 3 km grid, we can first notice an observed high interannual variability of daily extreme precipitation events in the French MED area, with years with a very low number of events and years with very high number of events. For example, for the 150 mm/day threshold, fewer than 5 events are observed in

1998, 2004, 2007, 2009 and 2012 whereas 10 or more events are observed in 2003, 2008, 2011 and 2014.

When considering the CP-RCM behaviour and comparing to observations, we notice a good match and a good representation of interannual variability by the CP-RCM. The years with a low number of events are the same for model and observations. In the same way, 2014, a particularly active year in the French Mediterranean region (Vautard et al. 2015), with an observed maximum of HPEs, stands out both for COMEPHORE and CNRM-AROME, especially for the 100 mm threshold (24 events for COMEPHORE and 23 for CNRM-AROME). Interannual correlations between CP-RCM and observations are significant at the confidence level of 99% for thresholds up to 200 mm/day. For the 100 mm/day threshold, the model reproduces well the annual mean number of events: the differences between model and observations are not significant at the confidence level of 95% for data both on the 3 and 12 km grids. For the highest thresholds, even if the differences are sometimes not statistically significant, it should be noted that CNRM-AROME underestimates the number of daily events with differences between model and observations of -30% for 200 mm/day and -62% for 250 mm/day on the 3 km grid.

For the CNRM-ALADIN RCM, we focus on the data on the 12 km grid (cf. Fig. 9cd and second part of Table 3). Unlike the CP-RCM, the CNRM-ALADIN RCM is not able to reproduce the interannual variability of the of high-intensity daily events: interannual correlation between RCM and observations is much lower than between CP-RCM and observations and only significant at the confidence level of 99% for the first 100 mm/d threshold. For all thresholds, the annual mean numbers of events simulated by the model are

Table 3 Annual mean numbers of daily events for COMEPHORE, CNRM-AROME and CNRM-ALADIN (in bold when the differences between model and observation means are not significant at a confidence level of 95%) and interannual correlation between models and observation (in bold if significant at a confidence level of 95% and

underlined if significant at a confidence level of 99%). The results are presented for the 3 and 12 km grids, for all daily thresholds and in the French MED area during the extended fall (SOND) between 1997–2016

3 km grid				
Daily thresholds	100 mm	150 mm	200 mm	250 mm
Annual mean number of events COMEPHORE	12.9	7.2	3.6	1.6
Annual mean number of events CNRM-AROME	13.7	5.7	2.5	0.6
Interannual correlation CNRM-AROME/COMEPHORE	<u>0.8</u>	<u>0.8</u>	<u>0.6</u>	0.3
12 km grid				
Daily thresholds	100 mm	150 mm	200 mm	250 mm
Annual mean number of events COMEPHORE	8.2	3.4	1.4	0.7
Annual mean number of events CNRM-AROME	8.1	2.6	0.6	0.1
Annual mean number of events CNRM-ALADIN	3.2	0.3	0.1	0.1
Interannual correlation CNRM-AROME/COMEPHORE	0.8	<u>0.7</u>	0.5	0.1
Interannual correlation CNRM-ALADIN/COMEPHORE	<u>0.7</u>	0.1	0.1	-0.1

statistically different from observations and clearly underestimated by the RCM, from -60 to -92% .

Hourly French Mediterranean events

We perform the same exercise for hourly precipitation: hourly events are defined by counting the number of hours per year where at least one grid point exceeds given thresholds in the French MED area during an extended fall season for the 1997–2016 period. We choose thresholds from 10 to 50 mm/h every 5 mm, and calculate the number of events both on the 3 km grid for COMEPHORE and CNRM-AROME and on the 12 km grid for all models and observations.

We present the interannual variations of the numbers of events for only the 10 and 20 mm/h thresholds in Fig. 10 and the main results for all thresholds in Table 4.

Similar conclusions can be drawn as for daily events: we observed a high interannual variability of the number of hourly events. The year 2014 stands out once again with a maximum of observed events for all thresholds (411 events for COMEPHORE for the 20 mm threshold).

CNRM-AROME demonstrates its ability to represent this interannual variability: interannual correlations between CNRM-AROME and COMEPHORE present high values above 0.8 for thresholds up to 30 mm/h and significant at a confidence level of 99% on the 3 km grid for all studied thresholds. 2014 also presents the maximum number of events (407 for CNRM-AROME for the 20 mm threshold). Considering the annual mean number of events, we notice an overestimation by the model of the number of events for thresholds between 10 and 20 mm/h (respectively $+40\%$ and $+27\%$) and an underestimation for those above 40 mm/h. The 25 and 30 mm/h thresholds are those with statistically similar annual numbers of events between model and observations (relative differences of $+11$ and -4%).

The interannual variability is once again not reproduced by the CNRM-ALADIN RCM, with an interannual correlation between model and observations significant only for the 10 mm/h and 15 mm/h thresholds. Moreover, we notice a clear and statistically significant underestimation of the number of hourly events: -79 to -100% , with no

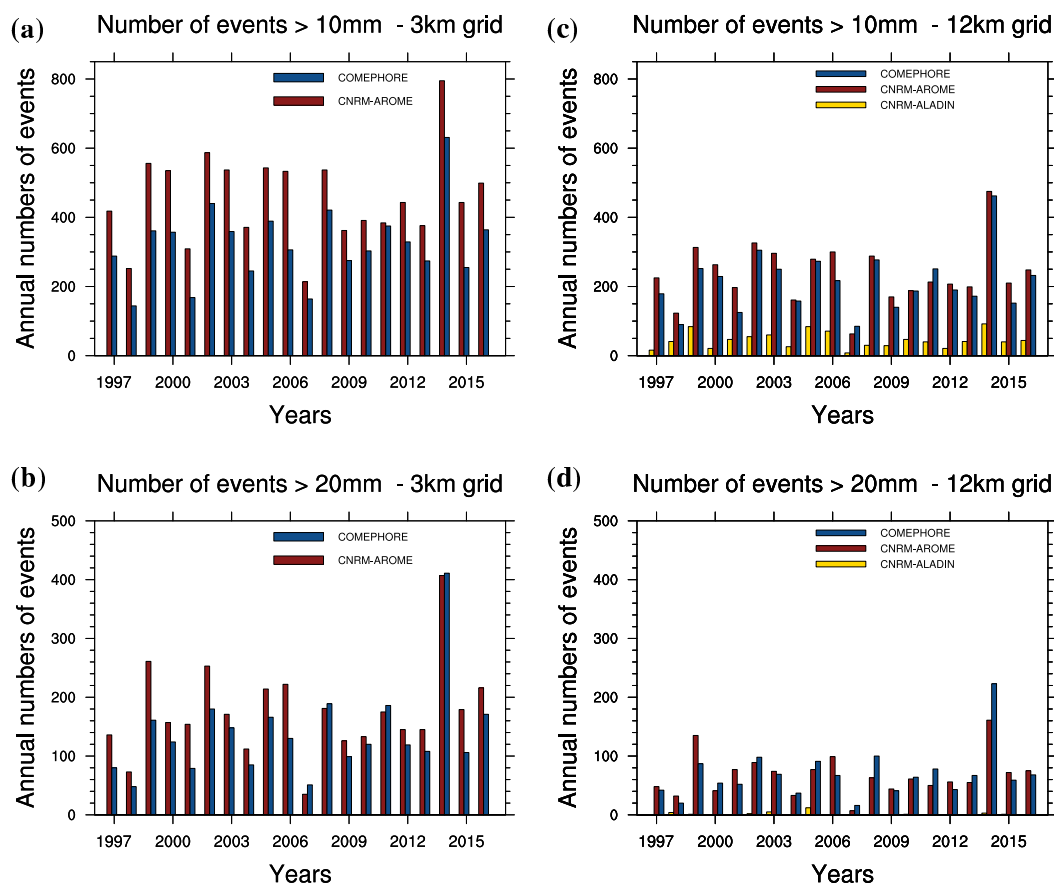


Fig. 10 Same as Fig. 9 but for the hourly events exceeding the 10 mm and 20 mm/h thresholds

Table 4 Same as Table 3 but for hourly events

3 km grid							
Hourly thresholds	10 mm	15 mm	20 mm	25 mm	30 mm	40 mm	50 mm
Annual mean number of events COME-PHORE	322.4	209.0	138.0	94.5	64.7	32.8	16.6
Annual mean number of events CNRM-AROME	454.2	282.0	175.8	105.0	61.9	21.0	7.3
Interannual correlation CNRM-AROME/COMEPHORE	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.6	0.6
12 km grid							
Hourly thresholds	10 mm	15 mm	20 mm	25 mm	30 mm	40 mm	50 mm
Annual mean number of events COME-PHORE	211.3	119.4	68.8	42.6	27.6	10.5	4.1
Annual mean number of events CNRM-AROME	237.2	126.2	67.5	33.1	14.9	2.8	0.5
Annual mean number of events CNRM-ALADIN	44.9	8.9	1.5	0.1	0	0	0
Interannual correlation CNRM-AROME/COMEPHORE	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.4	0.4
Interannual correlation CNRM-ALADIN/COMEPHORE	0.6	0.5	0.3	0.0	–	–	–

event above 30 mm/h in the RCM. The model is not able to reproduce hourly events above 10 mm/h correctly.

3.4 Intermediate conclusion on climate statistics

The analysis of daily and hourly quantiles in Sects. 3.1 and 3.2 and the study of interannual variability of daily and hourly events in Sect. 3.3 show that CNRM-AROME performs quite well in reproducing location, intensity, frequency and interannual variability of fall heavy precipitation events, in particular in the French MED area. However, we observe a tendency in CNRM-AROME to overestimate the low values of high precipitation percentiles, except in the Mediterranean area, and to underestimate the daily and hourly numbers of events for thresholds exceeding 200 mm/day and 40 mm/h, respectively.

With these overall positive results and in order to go beyond counting daily or hourly events exceeding thresholds, we can now study convective phenomena through a Lagrangian approach. Indeed, the basic statistical approach (Eulerian) neglects the spatial and temporal connections that may exist within a given event. An object-oriented approach with precipitating system detection and tracking will therefore allow us to study extreme precipitation events by evaluating the model's ability to reproduce the main characteristics of the convective events (duration, intensity, area...) represented by the convective systems, and not only by local rainfall amounts.

We show that the CNRM-ALADIN 12.5 km RCM, unlike the CP-RCM, is not able to reproduce realistic location and intensity values for extreme precipitation, and clearly

underestimates the number of heavy precipitation events. Our comments done on the daily time scale are even more true when focusing on hourly convective precipitation. As CNRM-ALADIN is not able to produce realistic precipitating systems, the tracking method will not be applied to this model in the following section.

4 Object-oriented approach: precipitating system detection, characteristics and tracking

4.1 Implementation

The precipitating system detection and tracking algorithm described in Sect. 2.3.5 and appendix C is applied on the 1-h accumulated precipitation field both to the COMEPHORE observational dataset and to CNRM-AROME on the overlapping domain, called "tracking domain" and plotted in black on the Fig. 1. Focusing on fall Mediterranean HPes, we apply it to twenty extended fall seasons (from September to December) from 1997 to 2016.

On a given area, for each time step, the algorithm firstly detects the precipitating systems, defined by contiguous grid points above given thresholds from 2 to 30 mm/h with a minimum area of 20 km². In a second time, trajectories are built by identifying links between cells at different time steps.

In Sect. 4.2, we first focus on the precipitating system characteristics, mainly in function of the different thresholds.

In Sect. 4.3, we focus on fall Mediterranean HPEs and present the characteristics of selected trajectories. To select the tracks, we have to keep in mind that one Mediterranean HPE can correspond to a combination of several convective systems (Duffourg et al. 2016), and therefore to several tracks. Similarly, the large diversity of HPEs in terms of duration and surface extension must be taken into account. To select tracks taking part in these heavy precipitation events, the following criteria are finally set :

- temporal and spatial criteria : all the tracks crossing the French MED area (defined in Sect. 2.3.4), in an extended fall season (September to December), are taken into account.
- a criterion to select convective precipitation : systems trajectories with mean intensities above 10 mm/h are selected.
- a criterion to select tracks occurring during days with heavy precipitation : we select all tracks occurring during days with 24-h accumulated precipitation exceeding the 100 mm threshold at least once over the French MED area (the 24-h accumulations are calculated on 24-h sliding windows in order to take into account events occurring between two calendar days).

We are aware that other options would have been possible, but we tried to choose a reproducible one, consistent with the rest of the study and based on the Mediterranean HPEs' characteristics.

We are also aware that the trajectories starting or ending over the Mediterranean sea, out of the tracking domain, will not be complete trajectories for these events but will be present in the tracking database. As the same information is missing in both the observations and the model, this does not bias the evaluation study, but as there is a missing element in the life cycle of some systems, the tracking database cannot be considered as a climatology of precipitating system trajectories.

4.2 Precipitating system characteristics

Mean behaviour

A first step in studying the characteristics of precipitating systems is to plot the spatial distribution of the annual mean number of cells for the twenty fall seasons (cf. Fig. 11 for the 10 mm threshold). When focusing on the figure for COMEPHORE observations, the southeast of France stands out in the fall season with a maximum exceeding 25 cells per year in the Cevennes region and the surrounding plains. French

Riviera and parts of Corsica also present a high number of cells above 10 mm.

For CNRM-AROME, the southeast of France is also the region with maximum values exceeding 25 cells per year above 10 mm, close to observations. We notice, however, a overestimation over central France in the western part of the tracking domain (to be related to the overestimation of the hourly 99.9th percentile in Sect. 3.2). In the southeast of France, the main observed maxima (Cevennes, French Riviera and Corsica) are also simulated by the model, but generally with a larger extension.

In the eastern Pyrenees, parts of the Alps and Corsica, the lower density of convective cells with COMEPHORE could be related to the known underestimation of rainfall by rain gauge and radar in the observational dataset over mountainous regions. Plotting spatial distributions on several time periods (cf. Appendix A Fig. 17) shows a relative improvement over time in COMEPHORE's distribution over mountains. If so, CNRM-AROME could present a more realistic behaviour in these areas.

The main statistics above threshold (annual mean number of cells, mean intensity and mean area) are presented in figure 12, both for COMEPHORE and CNRM-AROME, on the French MED area, where we find the major part of the convective cells in the fall season (around 70% of the total number of cells for the 20 mm threshold).

We first consider the annual mean numbers of cells and use a logarithmic scale to highlight the tail of the distribution for high thresholds. As expected, the number of observed cells strongly decreases when thresholds increase. We can see an overall good match between the number of cells of CNRM-AROME and observations. However, when examining details and computing significance statistical tests (described in appendix B), we can observe an overestimation of the number of cells by the model for the lowest thresholds and an underestimation for the highest thresholds.

The two other main characteristics of precipitating cells, mean intensity and mean area, also seem well represented by the model whatever the threshold and domain. However, model mean intensity biases are all significant at the confidence level of 95%: CNRM-AROME has a tendency to underestimate the intensity of the cells, with higher biases for higher thresholds. We can put the systematic errors of model intensity for low thresholds into perspective if we compare these biases (for example less than 0.1 mm for the 2 mm threshold and 0.4 mm for 10 mm) to observational measurement errors, which are of the same order of magnitude since the uncertainties in the precipitation measurement are about 5%. We also notice that the model produces overly small cells for low-intensity rainfall (2 mm threshold) and overly large cells above 10 mm. The areas are statistically comparable only for the 30 mm threshold at a confidence level of 95%.

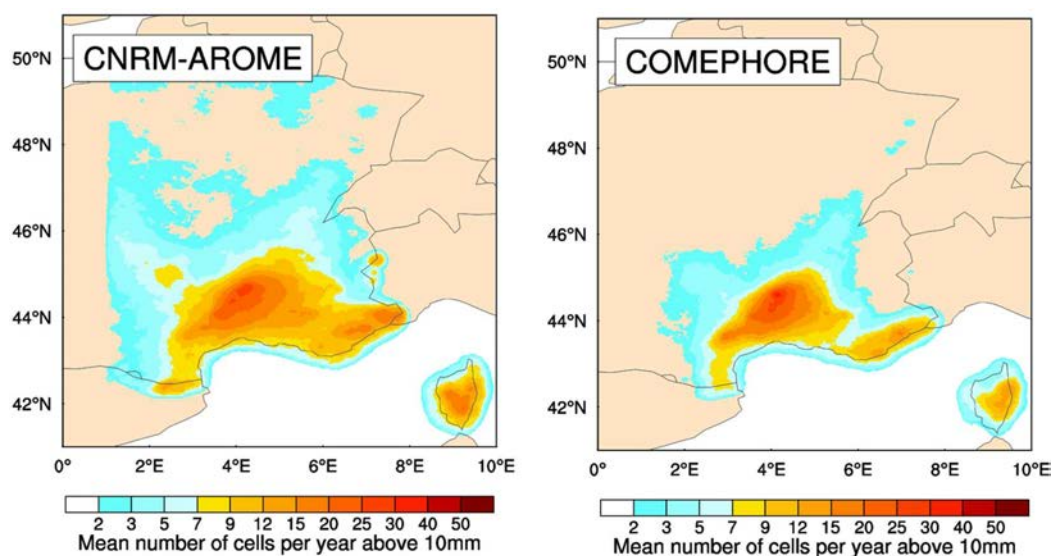


Fig. 11 Spatial distribution of the annual mean number of cells per year above the 10 mm threshold during the extended fall (SOND) between 1997–2016 for CNRM-AROME and COMEPHORE on the tracking domain

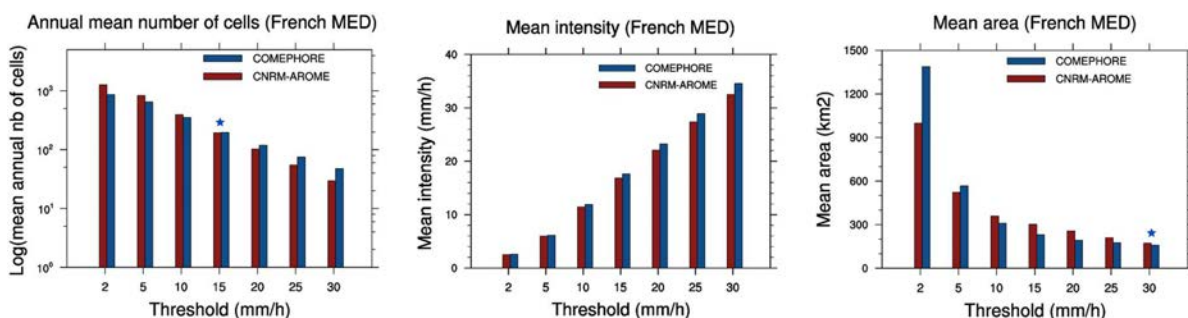


Fig. 12 Statistics above threshold of annual mean number of cells, mean intensity (mm/h) and mean area (km²) during the extended fall (SOND) between 1997–2016 for CNRM-AROME in red and COME-

PHORE in blue for the French MED area. A blue star is added when the differences between model and observation means are not significant at a confidence level of 95%

Interannual variability

Focusing on the French MED area, we present the variation of the annual numbers of cells in Fig. 13 for the 10 and 20 mm thresholds and the interannual correlations between model and observation for all thresholds in Table 5.

We notice a strong interannual variability of the number of cells exceeding defined thresholds, to be compared to the variability observed in the hourly precipitation event-based study (cf. Sect. 3.3). The year 2014 also appears here as an exceptional year for heavy rainfall in the French MED area, with more than twice the mean number of cells above 10mm.

CNRM-AROME is able to reproduce the interannual variability of the numbers of cells with significant interannual correlations for all thresholds at a confidence level of 99 % and using values reaching 0.9 for the thresholds from 5 to 20

mm. 2014 also appears as the year with the highest number of cells simulated by the model in the French MED area. However, when we look at the highest thresholds, a smaller number of cells is simulated by the model with respect to observations. This underestimation may be related to the underestimation found in the event-based study in Sect. 3.3 and in the previous subsection about the mean behaviour of the precipitating systems.

4.3 Tracking

Track characteristics

The comparison of tracks between observations and the model allows us to evaluate the model’s ability to produce realistic trajectory characteristics, such as number, duration,

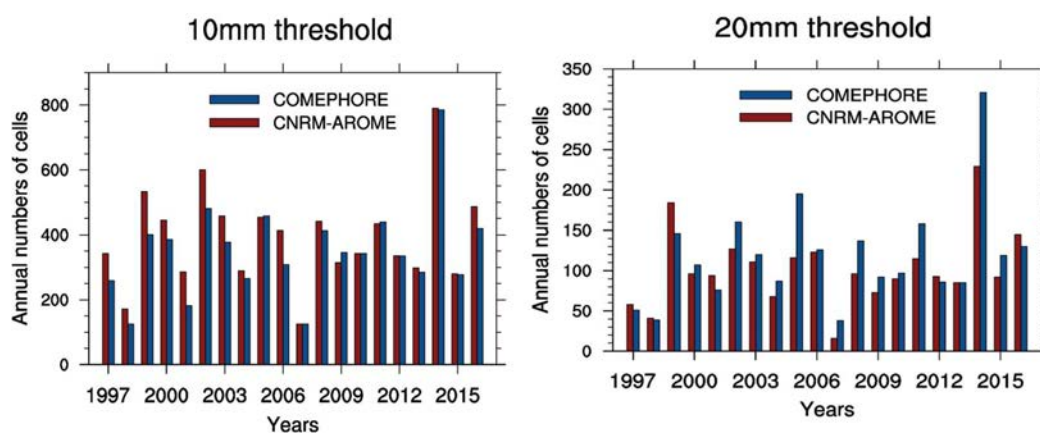


Fig. 13 Variation of the annual numbers of cells exceeding 10 and 20 mm in the French MED area during the extended fall (SOND) between 1997–2016 for COMEPHORE in blue and CNRM-AROME in red

Table 5 Interannual correlations between CNRM-AROME and COMEPHORE numbers of cells in function of the different thresholds (plotted in bold if significant at a confidence level of 95% and

underlined if significant at a confidence level of 99%). The results are presented for the French MED area during the extended fall (SOND) between 1997–2016

Thresholds	2 mm	5 mm	10 mm	15 mm	20 mm	25 mm	30 mm
Interannual correlation CNRM-AROME/COMEPHORE	<u>0.7</u>	<u>0.9</u>	<u>0.9</u>	<u>0.9</u>	<u>0.9</u>	<u>0.7</u>	<u>0.7</u>

maximum intensity, mean intensity, maximum area, horizontal moving velocity and severity (cf. Eq. (2) in Sect. 2.3.5) for a track selection focusing on Mediterranean fall HPEs, as defined in Sect. 4.1.

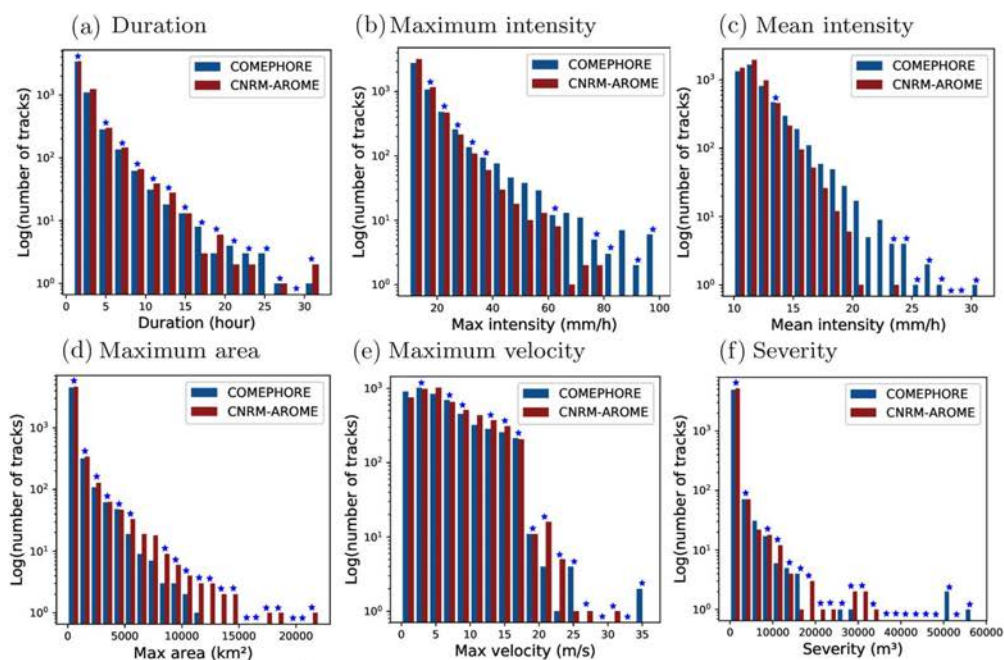
Variations of the number of tracks in function of these different characteristics are presented in Fig. 14a–f. The logarithmic scale for the number of tracks used in all the bar plots highlights the tail of the distribution but should be analysed with caution for the extreme part of the tail with a very low number of tracks. Similarly, the differences between model and observation systematically not significant at the confidence level of 95% for the tail of the distributions should not be over interpreted because of the low number of tracks.

We count 5054 tracks in the French MED area within the COMEPHORE observational dataset (around 250 tracks/year). If we focus on extreme events, we can observe around 10% of the observed trajectories lasting more than 5 h (with a maximum duration of 31 h), 10% presenting maximum intensities exceeding 30 mm/h (reaching nearly 100 mm/h for the most intense one) and 10% with maximum areas above 1200 km² (with a maximum of 13,000 km²). The two most severe tracks in COMEPHORE as defined through our severity index correspond to two extreme events known as hydrological reference events: the Gard event of

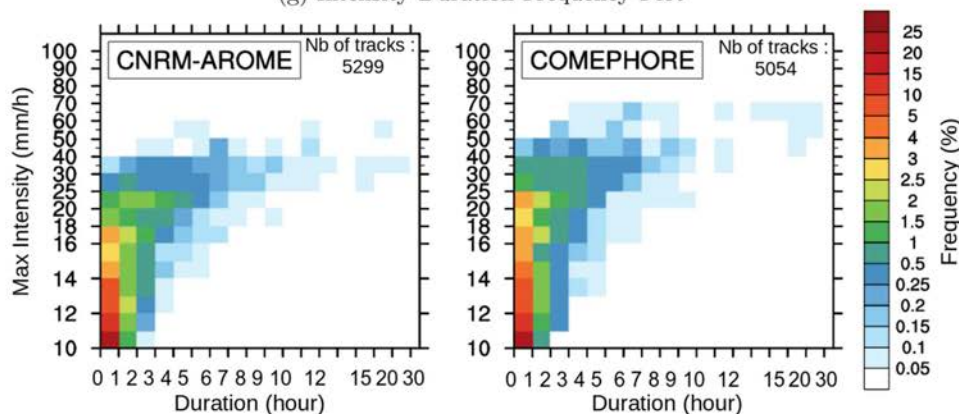
September 8–9, 2002 (Delrieu et al. 2005; Chancibault et al. 2006) (duration : 24 h, maximum intensity : 96 mm/h, mean intensity : 22.1 mm/h, maximum area : 5800 km², maximum velocity : 4 m/s, severity : 51,177 m³) and the Aude event of November 12–13, 1999 (Gaume et al. 2004; Bechtold and Bazile 2001) (duration : 25 h, maximum intensity : 92 mm/h, mean intensity : 16.3 mm/h, maximum area : 7167 km², maximum velocity : 13 m/s, severity : 55,872 m³).

We now focus on the track characteristics simulated by the CNRM-AROME CP-RCM. The first important result is the similar total numbers of tracks between the model and observations for the twenty years of extended fall: 5299 tracks simulated by CNRM-AROME compared to the 5054 observed tracks (265 tracks/year for CNRM-AROME compared to 250 tracks/year for COMEPHORE).

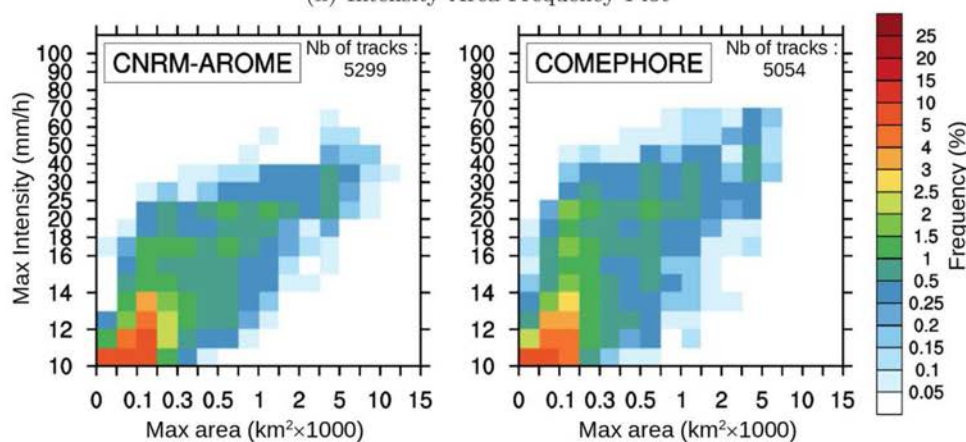
For the duration plotted in Fig. 14a, we can see that the track durations are very similar for CNRM-AROME and COMEPHORE with differences between model and observation almost always not significant at a confidence level of 95%: the model is able to simulate not only short events, but also long ones. Indeed, frequencies of tracks lasting more than 12 hours are close together, with 1.1% for COMEPHORE and for CNRM-AROME. Likewise, the maximum duration reaches the same value, 31 hours for the model and for observations.



(g) Intensity Duration Frequency Plot



(h) Intensity Area Frequency Plot



◀**Fig. 14** Variation of the number of tracks in function of **a** duration, **b** maximum intensity, **c** mean intensity, **d** maximum area, **e** velocity and **f** severity for CNRM-AROME in red and COMEPHORE in blue. A blue star is added when the differences between model and observation means are not significant at a confidence level of 95%. **g** presents IDF plot and **h** IAF plot for CNRM-AROME and COMEPHORE. In all the figures, we consider all tracks of cells exceeding 10 mm/h occurring during days exceeding 100 mm/day in the French MED area during the extended fall (SOND) between 1997 and 2016

If we now examine the intensity (cf. Fig. 14bc), we observe that the CP-RCM seems able to represent maximum intensity values below 40 mm/h correctly. However, above 40 mm/h, there is an increasing underestimation of the maximum intensities by CNRM-AROME that fails to reproduce the most intense events with a maximum of 80 mm/h for the model compared to the observed maximum of nearly 100 mm/h. From a statistical point of view, the underestimation by the model is significant for most of the intensity values. Similar comments can be done focusing on mean intensity.

For the maximum areas of the tracks in Fig. 14d, we notice an overall good representation by the CP-RCM with differences between model and observation almost always not significant at a confidence level of 95%. However, we observe a tendency of CNRM-AROME to overestimate the largest areas above 5500 km². The maximum area is much larger for the model with 22,000 km² than for observations with 13,000 km².

For the maximum horizontal velocity plotted in Fig. 14e, we can see a good match between model and observation with similar moving speed distribution. However, a significant underestimation of the number of tracks by the model is observed for the lowest velocities corresponding to slow-moving systems. More generally, CNRM-AROME tends to simulate tracks with higher velocities than COMEPHORE.

The severity index (cf. Fig. 14f) proposes very similar distribution between model and observations. The most severe tracks (severity above 10,000 m³) represent around 0.5% of the total number of tracks for the model and 0.4% for the observations. The most severe track with CNRM-AROME also corresponds to the hydrological reference event of the Gard event in September 8–9, 2002 (duration : 31h, maximum intensity : 73 mm/h, mean intensity : 17.4 mm/h, maximum area : 9907 km², maximum velocity : 8 m/s, severity : 32,100 m³). Unlike other characteristics and except three severity values standing out in the observations and linked with the highest intensities, we notice similar severity values between model and observation even for the tail of the severity index distribution. We should perhaps question whether the good results for the CP-RCM in terms of representing this tail of distribution are due to bad reasons: the intensity underestimation might be compensated by the overestimation of cells areas by the model or differences in the systems motion.

Intensity duration frequency (IDF) and intensity area frequency (IAF) plots

In order to combine two track characteristics, we present an IDF plot: I for maximum Intensity on the y axis, D for Duration on the x axis and F for Frequency in color (cf. Fig. 14g for CNRM-AROME and COMEPHORE). Frequency is defined as the combined occurrence of maximum intensity and duration values in chosen bins, normalised by the total number of tracks. In the same way, we present an IAF plot for maximum Intensity Area Frequency plot in Fig. 14h.

The comments on maximum intensity and duration bar plots can also be applied when analysing the IDF plots, which have the advantage of presenting a combination of the two parameters. The patterns of IDF plots are very similar between model and observations with the same range of values for the two studied parameters. Some long events are present in both figures, but the most extreme events (above 40 mm/h) are missing within CNRM-AROME. An additional piece of information provided by these figures is that the long-lasting tracks correspond to intense events for both the model and the observations (with maximum intensities above 30 mm/h), which can be related to mesoscale convective organisation such as large MCSs involved in Mediterranean HPEs (Hernandez et al. 1998).

The IAF plots show similar patterns for CNRM-AROME and COMEPHORE, but we can see a shift towards larger areas, increasing as the intensities increase : the model tends to simulate cells that are too large compared to observations. As we have noticed the correspondence between the long-lasting and intense events on the IDF plots, we observe here a relationship between the tracks presenting the largest areas and the most intense ones.

Bubble plot

In order to combine more tracks characteristics, we also present a bubble plot inspired by Darmaraki et al. (2019): four characteristics of each individual track are plotted with the maximum intensity on the y axis, the duration on the x axis, different sizes of circle corresponding to the maximum area and different colors in function of the severity index (cf. Fig. 15).

These plots are of little interest over all trajectories, but can be relevant for a defined subset of tracks. Here, we choose to plot the ten most severe tracks for CNRM-AROME and COMEPHORE in order to examine the possible compensation of model intensity underestimation and area overestimation in the tail distribution of the severity index. The plotted tracks correspond to around 0.2% of the total number of tracks for both subsets. The majority of the most severe tracks (7/9 for COMEPHORE and 7/7 for CNRM-AROME) are related to known HPEs after comparing the dates with the established list of HPEs up to 2010 by Ponzano et al. (2020). Similarly, most severe tracks of COMEPHORE correspond

to events present in the Meteo-France database of extreme precipitation (<http://pluiesextremes.meteo.fr/>) and four of these are related to events with accumulated rainfall exceeding 400 mm. The three observed tracks with duration around ten hours and moderate intensities correspond to quasi-stationary events, showing the relevance of adding velocity in the severity index definition. In COMEPHORE, three tracks present much higher severity values than the others : these high values are linked with very high maximum intensities for two of them and stationarity associated to long duration for the third one. As expected, we can observe larger cell areas with CNRM-AROME than with COMEPHORE for the ten most severe tracks, and a larger range of intensities for the observations with three tracks whose maximum intensity exceeds 80 mm/h. With the CP-RCM, there is a rather good match between long-lasting and intense events, which is less true in the observations, where maximum intensities or stationarity can prevail in the most intense events. Moreover, CNRM-AROME is able to simulate events with high severity values. The relevance of adding velocity in the severity index definition is again shown with a simulated severe event coloured in red in Fig. 15, corresponding to relatively low maximum intensity and maximum area, but linked with stationarity. In fact, these figures allow us to summarise the main results concerning the tail of the track distribution: CNRM-AROME is able to simulate fall extreme events in the French MED area, which are long-lasting and severe. However, it does not succeed in proposing maximum intensities of the same range of values as those observed and tends to overestimate the maximum areas of cells.

5 Discussion

5.1 The need for reliable precipitation datasets

High temporal and spatial resolution observational datasets are necessary for carrying out climate model evaluation studies dealing with kilometric-scale CP-RCMs. The study of hourly precipitation extremes at the kilometric scale imposes strong constraints on the choice of observational reference databases because of the high variability in space and time of surface rainfall. For example, with daily and 25 km resolution data, the European EOBS database (Haylock et al. 2008; Cornes et al. 2018) is not relevant (Hofstra et al. 2010; Lenderink 2010; Flaounas et al. 2012; Prein and Gobiet 2017). Similarly, the satellite precipitation analyses of CMORPH (Joyce et al. 2004), TRMM (Huffman et al. 2010) and GPM (Hou et al. 2011) present a too-coarse resolution of 25km. A problematic bias can also be added for datasets using a convection parameterised model to disaggregate hourly fields from the daily amount (Bosilovich et al. 2008; Parker 2016), such as the SAFRAN precipitation analysis (Durand et al. 1993; Quintana-Segui et al. 2008; Vidal et al. 2011). A solution for improving precipitation datasets and compensating for the insufficient density of rain gauges is the use of datasets merging rain gauges and high-resolution (around 1 km), temporally and spatially continuous weather radar data. Relevant hourly and kilometric gridded datasets of this kind already exist in France, Switzerland and Germany, but not yet in Italy, Spain or Croatia.

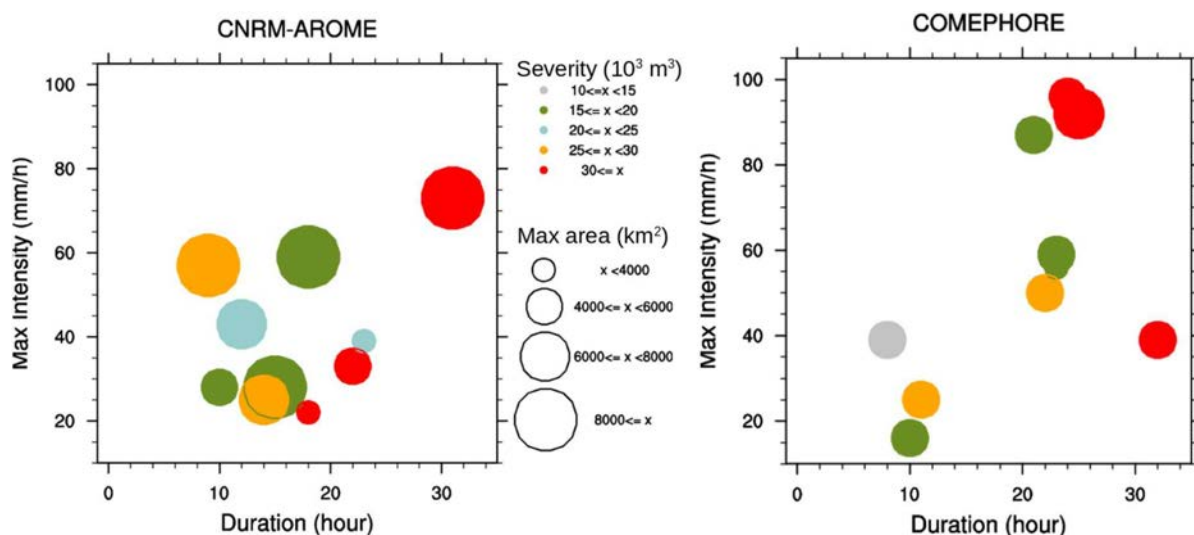


Fig. 15 Bubble plots for CNRM-AROME and COMEPHORE for the ten most severe tracks of cells above 10 mm/h occurring during days exceeding 100 mm/day in the French MED area during the extended fall (SOND) between 1997 and 2016

The limitations of observations should also be kept in mind when analysing comparisons between models and observations before jumping to conclusions. For example, rain gauge measurement errors such as possible underestimation of rainfall due to undercatchment in case of strong wind and/or low rainfall intensity or snowfall conditions (Neff 1977; Yang et al. 1999) is particularly true in mountainous areas. Radar measurement also presents errors such as a masking effect leading to precipitation underestimation in complex topography areas or overestimation in case of hail. In the study, temporal and spatial discontinuities inside and between datasets must be taken into account as much as possible. For example, it is worth mentioning that in the COMEPHORE product, the number of radars increases over time and the processing method has evolved since 2007 (cf. appendix A). Its quality and therefore its ability to detect precipitating events are improving over time, which can affect the temporal homogeneity of the results.

It is also important to note the difference between grid resolution (i.e. grid spacing) and effective resolution of observational datasets. For gridded datasets based on stations, the effective resolution depends mainly on local stations densities. Isotta et al. (2014) indicate an effective resolution of around 10–20 km for the 5 km daily precipitation dataset APGD-EURO4M. To our knowledge, no studies about effective resolution were carried out for the other datasets. This difference between grid resolution and effective resolution should prevent us from over-interpreting the results because some details and phenomena cannot be represented in the datasets.

In the near future, improvements are expected in precipitation measurement and datasets. For example, the recent use of X-band dual-polarization radar (Anagnostou et al. 2018) limits the problematic underestimation over mountains. We can also imagine a European precipitation gridded product based on radar data from the OPERA European operational Weather Radar Network (Saltikoff et al. 2019) and European rain gauge data. Over the sea, rainfall estimation products based on satellite imaging should increase temporal and spatial resolutions.

5.2 Added value of the CP-RCM compared to the RCM

The added value of the CNRM-AROME 2.5 km CP-RCM for representing fall Mediterranean HPEs is proved compared to the CNRM-ALADIN 12.5 km RCM, extending the added value found over the Cevennes region by Fumière et al. (2020). This study also confirms the better representation of Mediterranean fall intense events mentioned in Berthou et al. (2020) in two 2.2 km CP-RCMs compared to their driving RCMs. Focusing on fall HPEs, it also illustrates the improvements in the representation of fine-scale details

of heavy precipitation in the CP-RCMs compared to RCMs found in the recent multi-model studies on the common pan-Alpine domain (Ban et al. 2020; Pichelli et al. 2020).

Disentangling the origin of the CP-RCM added value is beyond the scope of this study and would require additional and costly experiments. One reason is undoubtedly the higher horizontal resolution, which allows a more detailed representation of topography and surfaces. This improvement likely leads to stronger mesoscale convergences and orographic circulations. However, the CP-RCM higher horizontal resolution cannot explain all the observed differences between CNRM-AROME and CNRM-ALADIN. The explicitly simulated deep convection and physical parameterisations adapted to mesoscale processes in the CP-RCM probably also contribute to improving the simulation of organised convection by CNRM-AROME. For example, CNRM-AROME reproduces the location of hourly extreme rainfall in the foothills and plains, while CNRM-ALADIN tends to limit them over mountain peaks. This can probably be related to the CP-RCM's ability to simulate mesoscale processes such as cold pools, which can trigger convection far from the topography. In addition, the CP-RCM seems to better represent hourly organised convection over sea, away from topographic triggering. The processes involved, such as cold pools and mesoscale circulations, are explicitly simulated by the CP-RCM dynamics while they are subgrid processes and therefore parameterised in the RCM. Further, it is worth mentioning that the CP-RCM also clearly improves precipitation means and the number of wet days over mountains at the daily time scale with respect to the RCM (cf. appendix D). The overestimation in the RCM could be linked to a too-strong orographic lifting effect in the convection parameterisation, while it is correct in the CP-RCM. We consider that extending the above assumptions with further process-oriented analyses of the CP-RCM/RCM differences may guide improvements in the RCM physical parameterisations.

5.3 The CP-RCM weaknesses

While the CP-RCM's behaviour is mainly positive, the study also highlights some limitations of CNRM-AROME. The main one is that the model cannot correctly reproduce very high precipitation intensities at daily scale above for 200 mm/d and at hourly scale above 40 mm/h. This limitation has also been shown in the previous study by Fumière et al. (2020): on a Cevennes box, the model is no longer able to reproduce realistic percentiles within the COMEPHORE confidence interval above the value of 230 mm/d for daily rainfall and 30 mm/h at hourly scale. This underestimation of high intensity rainfall is also found in Brousseau et al. (2016) with the 2.5 km AROME model used in NWP. But we cannot generalise this CPM bias, which depends on the

model: for example, Lean et al. (2008) highlighted that the 4 km UM model simulated too heavy rainfall : an opposite behaviour to the CNRM-AROME one. The diversity of CP-RCM's behaviours concerning precipitation intensity is also demonstrated in the CP-RCM multi-model evaluation by Ban et al. (2020). Other CNRM-AROME limitations include a tendency to overestimate hourly extreme precipitation over regions with low quantile values, a tendency to overestimate low precipitation and a tendency to produce too-large cells, especially for high intensities. This weakness can similarly be seen in the studies by Brousseau et al. (2016) for AROME, Lean et al. (2008) and Stein et al. (2015) for the UM model. CNRM-AROME also presents a tendency to simulate higher values of the precipitating systems' horizontal moving speed, whereas the translation speed of the MCSs is remarkably well simulated by the 4 km WRF model over the US in the study by Prein et al. (2020).

It is difficult to determine if the CNRM-AROME weaknesses are all linked and to understand their origin, but two main reasons can be proposed: the need for physical parameterisation improvements and the increase in resolution. Indeed, while deep convection is explicitly resolved by the model dynamics in convection-permitting models, subgrid processes such as shallow convection, turbulence and micro-physical processes still need to be parameterised. Moreover, no specific changes have been made in these parameterisation schemes when using the AROME version from NWP to climate mode, while the assimilation of observed data can no longer correct the model. Improvements or adaptations in these parameterisations can be a way to solve the model limitations. Another possible explanation comes from the 2.5 km horizontal resolution of CNRM-AROME and the 60 vertical levels, which may not quite be sufficient to explicitly resolve deep convection and correctly represent the characteristics of some convective cells. Indeed, 2.5 km is the grid resolution and not the effective resolution, which is the resolution from which smaller scales processes are not adequately represented by the model. A study by Ricard et al. (2013) based on kinetic energy spectral analysis (Skamarock 2004) shows that the effective resolution of AROME at 2.5 km resolution is around $9-10\Delta x$ and the smallest wavelength represented in the model is 5 km, i.e. twice the grid resolution. The efficient semi-implicit semi-Lagrangian numerical scheme used limits the model's resolving capability and prevents some phenomena to be correctly represented by the model. An increase in resolution might improve these problems. Indeed, Brousseau et al. (2016) showed the improvement of AROME when the horizontal grid resolution increases from 2.5 to 1.3 km

and vertical resolution from 60 to 90 levels: higher resolution allows more realistic convective cells in terms of size, number, intensity and lifetime. We can assume that increasing the resolution in CNRM-AROME could also improve the representation of cell characteristics in the model, but computational capabilities do not yet allow the resolution of the climate convection-permitting model to be increased.

6 Conclusion

A 38-year continuous simulation of the CNRM-AROME Convection-Permitting Regional Climate Model (CP-RCM) at the resolution of 2.5 km is performed over a large pan-Alpine domain, which is to our knowledge the longest CP-RCM existing simulation. This long continuous climate simulation with a high-resolution CP-RCM makes it possible to carry out robust climate studies of extreme events such as Mediterranean Heavy Precipitation Events (HPEs).

The main objectives of the study are:

- to extend the results of the previous study using CNRM-AROME and focusing on French Mediterranean HPEs (Fumière et al. 2020);
- to consider these high-impact events as objects by applying a precipitating system detection and tracking algorithm to assess whether the CP-RCM is able to reproduce the HPEs' main characteristics.

Therefore, the CNRM-AROME CP-RCM simulation is compared to selected high spatial and temporal resolution observational datasets, such as the French kilometric and hourly COMEPHORE dataset now available for a 20-year period, and to its forcing simulation of the CNRM-ALADIN convection-parameterised Regional Climate Model (RCM). The comparison between the two models and observations leads to the following results:

- CNRM-AROME is able to represent northwestern Mediterranean fall extreme precipitation at a daily scale and even better at an hourly scale: CNRM-AROME demonstrates its ability to represent HPEs in terms of location and intensity of extreme rainfall with daily 99th and hourly 99.9th percentiles values close to observational values, especially in areas with high percentile values. Daily and hourly event-based studies also show CNRM-AROME's ability to represent extreme precipitation frequency and interannual variability;

- outside the Mediterranean region, CNRM-AROME tends to overestimate hourly precipitation extremes. In the French Mediterranean, the model underestimates the number of events for high thresholds at daily scale above 200 mm/day and at hourly scale above 40 mm/h;
- the study shows the added value of the CNRM-AROME CP-RCM for fall extreme precipitation compared with the CNRM-ALADIN RCM, probably thanks to the combined effects of high-resolution, explicitly resolved deep convection and physical parameterisations adapted to mesoscale processes.

This study verifies and extends the main results of Fumière et al. (2020) on a longer period, a larger domain and with an improved version of the CNRM-AROME CP-RCM, making the results more robust.

The good behaviour of CNRM-AROME allow us to go beyond the basic Eulerian statistical approach and to set up an object-oriented Lagrangian approach in order to take into account the spatial and temporal connections that may exist within a given event. A precipitating system detection and tracking algorithm is applied to 1-h accumulated precipitation fields on a period of twenty fall seasons, both for the CNRM-AROME CP-RCM and the reference COMEPHORE precipitation dataset. This approach turns out to be an efficient tool for evaluating high-resolution climate models. Considering French Mediterranean HPEs as objects, CNRM-AROME's ability to represent the main characteristics of fall convective events is highlighted in terms of location, number, mean intensity and area for precipitating systems and in terms of number, duration, intensity, area, velocity and severity for tracks. Its main limitation is the underestimation of high precipitation with an important bias in the number of cells for high thresholds and the lack of tracks with maximum intensity values exceeding 40 mm/h. CNRM-AROME also tends to overestimate moderate rainfall, with too many cells for thresholds below 5 mm/h. The overestimation of cells areas increasing along with intensities is also noted. It is not yet possible to limit these biases by increasing spatial and vertical resolutions in climate models, but improving and adapting physical parameterisations could be a way to reduce these weaknesses.

Knowing CNRM-AROME's strengths and weaknesses in reproducing the northwestern Mediterranean extreme fall precipitation, we can now consider applying the detection and tracking tool to historical and scenario CP-RCM simulations in order to characterise possible changes in the organisation of convection in the context of climate change. Another interesting possibility would be to apply the object-oriented approach to other CP-RCMs to determine if the results obtained in the current study are robust to the choice of the CP-RCMs. Finally, taking advantage of this long simulation, the study could be completed by the study of

trends in the main characteristics of the Mediterranean heavy precipitation events extending studies based on observation such as Ribes et al. (2019).

A COMEPHORE

COMEPHORE (Combinaison en vue de la Meilleure Estimation de la Précipitation HORaire) is a high-resolution (1 km×1 km) and hourly gridded dataset of precipitation merging radar and rain gauge observations provided by Météo-France over metropolitan France (Tabary et al. 2012; Fumière et al. 2020). It is available from 1997 to 2016. The first ten years of COMEPHORE (1997–2006) were already used as an observational reference in the first evaluation study of the CNRM-AROME CP-RCM (Fumière et al. 2020). COMEPHORE is also used in Ban et al. (2020) and Pichelli et al. (2020). As this dataset is the reference for our extreme precipitation evaluation study over the southeast of France, we include a detailed description below.

The COMEPHORE observational dataset is based on local radar 5 min reflectivities and rain gauge data (approximately 4000 rain gauges with a daily timestep including approximately 1200 rain gauges with an hourly timestep, cf. Fig. 16). The beginning of the period, 1997, is constrained by the availability of archived radar data for the French ARAMIS network. The processing chain is detailed in Tabary et al. (2012). To summarise, after corrections linked to radar measurement errors, daily accumulations of local radars reflectivities are computed and completed by rain gauge data. Afterwards, a temporal interpolation to hourly data is carried out taking into account hourly measurements. Since 2007, the processing method has benefited from some improvements in the radar data processing. Adding different radar measurements at different elevations and satellite cloud classification to determine the probability of rain, the daily fusion with rain gauges uses a new daily reference obtained via the ANTILOPE method merging radar and rain gauge data with a separation between stratiform and convective rainfall (Laurantin 2008). Then, twenty-four intermediate rainfall accumulations calculated with ANTILOPE are used for the temporal interpolation to an hourly time step.

ADVANTAGES

COMEPHORE allows a good quality climatology of daily surface precipitation accumulation over long time steps (seasonal) to be reproduced, with values similar to those obtained with the Lassegues (2018) dataset, a high-resolution dataset resulting from a kriging of rain gauge daily rainfall data over France (Roger 2018). Thanks to the use of high spatial resolution and coverage radar, COMEPHORE provides information in regions where the density of stations is low and allows a better representation of extreme values with a refined representation of temporal and spatial

precipitation fields and therefore a better localisation of heavy rainfall peaks and higher maximum intensities values (Roger 2018). With a focus on the southeast of France, Fumière et al. (2020) show that COMEPHORE is a more suitable product for the study of fall extreme precipitation than the SAFRAN database (Durand et al. 1993; Quintana-Segui et al. 2008; Vidal et al. 2011).

LIMITATIONS

If corrections of errors related to radar measurement are made in the COMEPHORE processing, a mask effect problem in areas with high altitude leads to the underestimation of precipitation amounts in mountainous areas above 1500 m (Roger 2018). COMEPHORE does not yet have correction taking altitude into account, and these regions also encounter a low density of rain gauges and undercatchment problems. The regions with the lowest-quality data are limited to parts of the Alps, limited parts of the Pyrenees and the western part of Corsica (cf. Fig. 16). While the number of rain gauges is more or less consistent over time, the number of radars over France has increased, especially in the first few years and in the southeast: from 10 radars in 1997 to 24 from 2006. From November 2015, 3 X-band radars located in the Alps were added to the network. Moreover, beginning in 2007, the use of ANTILOPE intermediate hourly accumulations has improved the processing method, with a better calibration and consideration of convective rainfall and a decrease in underestimation in mountainous areas (Roger 2018). These two last points lead to an improvement of COMEPHORE precipitation representation over time, but can also lead to temporal inhomogeneity that must be kept in mind when using it.

In order to verify if COMEPHORE's expected quality improvement over time can affect our results, we calculate the spatial distribution of the annual mean number of cells per year above the 10mm threshold during the extended fall (SOND) on several time periods (cf. Fig. 17). Even if measuring heavy precipitation over mountains is still challenging (Yu et al. 2018), we observe a relative improvement in COMEPHORE's distribution over mountains, in particular in 2016 when X-band radars were implemented in the Alps. Over Corsica, with the implementation of a new radar in 2003, an increase of the number of observed cells above 10 mm between 1997–2006 and 2007–2016 is also noticed.

Despite these limitations, COMEPHORE is the best available hourly and kilometric precipitation product over France and over a long period (20 years), which makes it especially suitable for studying fall Mediterranean HPEs.

B Statistical tests

B1 Bootstrapping method

The following bootstrapping method is used to validate the statistical significance of model bias differences at the 90% confidence level. For each observation/model common period defined in Sect. 2.3.2, observations and model datasets are simultaneously resampled with replacement for the same time period so that resampled datasets contain the same meteorological conditions for all datasets. The resampling is done for time blocks of one-season in order to avoid over-confident estimates due to temporal correlation.

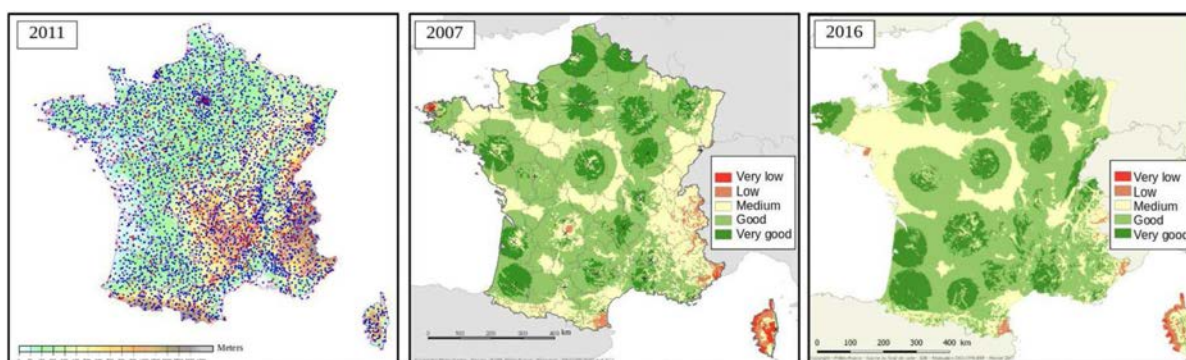
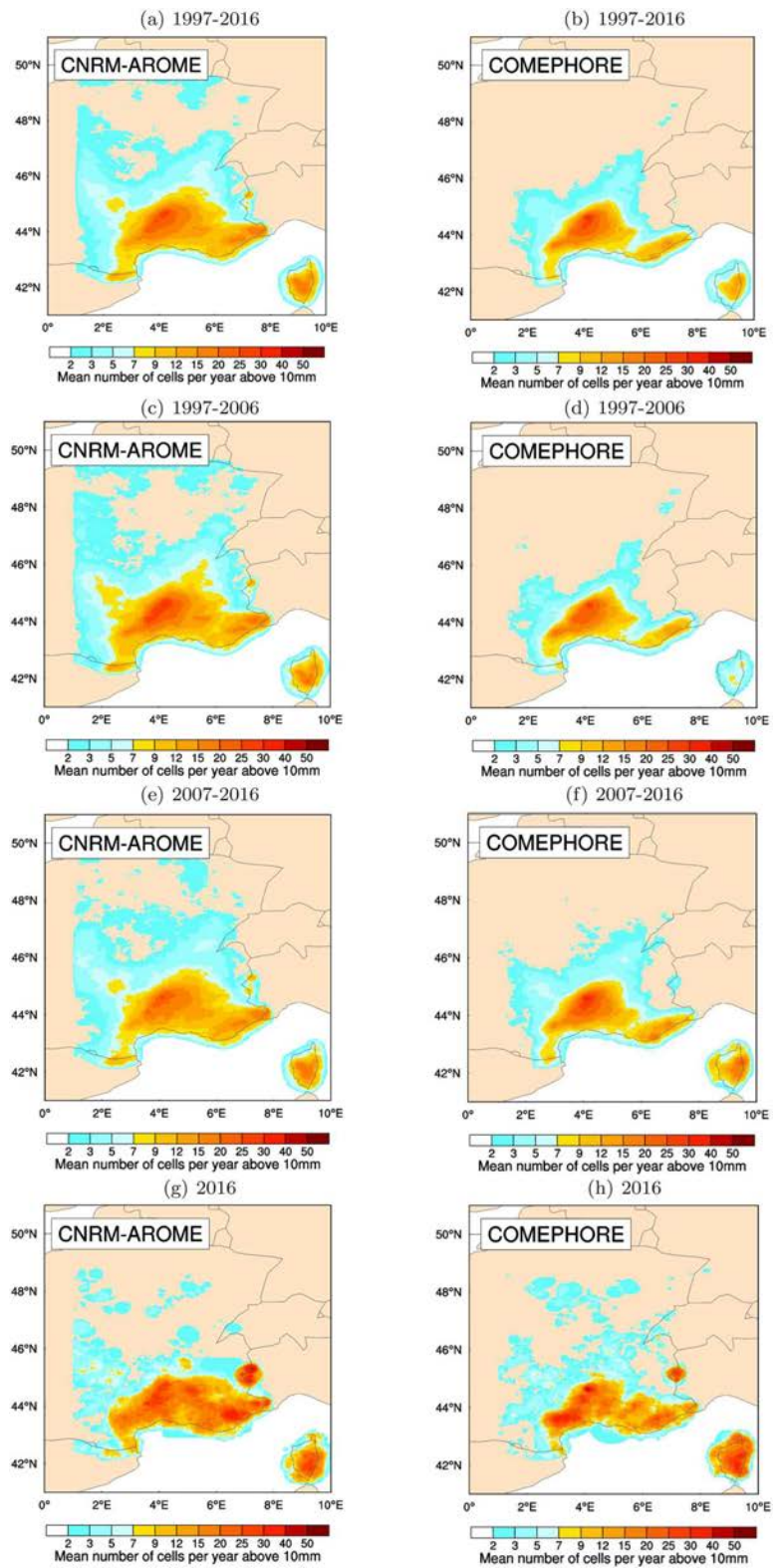


Fig. 16 On the left, map of French daily rain gauge network in 2011 (3825 stations); in the middle and on the right, maps of the quality of the radar rainfall measurement with the French radar network in 2007 and in 2016. Source: Météo-France

Fig. 17 Spatial distribution of the annual mean number of cells per year above the 10 mm threshold during the extended fall (SOND) for CNRM-AROME and COMEPHORE on the tracking domain for several time periods



We then calculate percentiles for each resampled datasets on each point of the domain and compute the 5th–95th percentile ranges of the differences between the percentiles of the two datasets. For each grid point, if the zero value is included in the range, we conclude that the difference between the studied percentiles of the two datasets is not significant at the 90% confidence level. For computational reasons, we apply the bootstrapping method only to data on the 12 km grid, and a choice of 100 resamples is done. A test with 1000 resamples is carried out for daily 99th percentile for a couple of datasets and gives very similar results.

B2 Interannual correlation and significance

To evaluate the interannual variability of the models in terms of the number of daily and hourly events (cf. Sect. 3.3) or the number of precipitating cells (cf. Sect. 4.2), interannual correlations are calculated for n pairs of model and observational annual data, computing the Pearson sample linear cross-correlation coefficient r . This correlation coefficient for n pairs of independent data (we can indeed consider each year to be independent) is then tested against the null hypothesis (i.e. no correlation) using the Student test with two levels of confidence, 95% and 99%.

B3 Significance of mean differences

In Sects. 3.3, 4.2 and 4.3, the paired-sample Student test with a confidence level of 95% is used to compare the means between two related groups of samples (i.e. annual means for model and observation) for different parameters, such as number of events or tracks, intensities or areas per threshold.

C Precipitating system detection and tracking algorithm

C1 Choice of the algorithm

The object-oriented approach used here to study HPEs involves the implementation of a precipitating system detection and tracking algorithm. Different methods already exist some coming from NWP model verification or from now-casting methods, and others developed specifically for this purpose.

Several methods have already been applied to CP-RCM. In the US, the object-oriented method used to verify the operational precipitation predictions of high-resolution models, called MODE (Davis et al. 2006, 2009), has been applied by Prein et al. (2020) for 4 km WRF climate simulations in order to evaluate the model ability to reproduce MCSs and is based on 1-h accumulated precipitation exceeding the 5 mm/h threshold. The same algorithm has been applied to characterise precipitation features in western Canada by Li et al. (2020). In Germany, a method of convective cells tracking on 5 min precipitation fields exceeding the 8 mm/h threshold has been developed to verify if the COSMO-CLM CP-RCM (2.8 km) reproduces sub-daily convective cells characteristics well (Brisson et al. 2018). A storm-tracking algorithm developed by Stein et al. (2014) and using a thresholding of 1 mm/h is applied to regional climate model simulations of the Met Office Unified Model and to observations to assess the representation of West African Storm lifecycles by convection-permitting simulations (Crook et al. 2019). Fitzpatrick et al. (2020) apply a similar method to outgoing longwave radiation fields coming from a CPM of 4.4 km resolution in order to track MCSs in the West African Sahel. Studies on MCSs in the Midwest US were also carried out by Haberlie and Ashley (2019) using a tracking method based on observed and simulated radar reflectivities.

Further, other tracking algorithms have already been applied to the AROME model. The TOOCAN algorithm (Fioleau and Roca 2013), developed to detect MCSs and based on satellite infrared images, is applied by Beucher et al. (2014) to hourly precipitation fields of AROME in the tropics. In order to evaluate high-resolution precipitation forecasts and avoid double-penalty problems, an approach based on the identification of homogeneous rainfall areas through similarity constraints of the distribution has recently been developed at CNRM (Arbogast et al. 2016; Rottner et al. 2019; Raynaud et al. 2019), but with no temporal tracking at this point.

Object-oriented tools have been used for many years in nowcasting. In CNRM, the ISIS (Instrument de Suivi dans l'Imagerie Satellitaire) tracking algorithm developed by Morel and Senesi (2002a) and initially based on satellite infrared imagery to characterise European MCSs (Morel and Senesi 2002b) is still applied to 5 min radar reflectivities to monitor precipitating active areas in storms. Brousseau et al.

(2016) use this algorithm to characterise improvements in the convective cell simulation of AROME-simulated radar reflectivities between 2.5 and 1.3 km resolutions.

The last method following Morel and Senesi (2002a), developed in CNRM and already applied in precipitation nowcasting and for AROME evaluation, is chosen for the evaluation of the CNRM-AROME CP-RCM.

C2 Methodology

The complete description of the detection and tracking algorithm is provided in Morel and Senesi (2002a). For our study, the tool is adapted to an 1-h accumulated precipitation field, instead of the 5-min radar reflectivities used in its nowcasting version. The method can be briefly described as follows and in Fig. 18:

– First step: *interpolation and smoothing*

Hourly precipitation fields are interpolated to common regular 3km grid. Specific smoothing is performed and allows the precipitation field to be less noisy, while still preserving high values. A first smoothing replaces each grid point by a weighted average of the eight adjacent grid points. Then, a second smoothing consists in applying a Gaussian filter with a small standard deviation (0.5) on a moving window of 5×5 grid points. This small value of standard deviation allows for a slight smoothing.

– Second step: *detection of the cells*

Cells are defined every hour at time (t). A cell is defined as contiguous grid points above a given threshold with a minimum area of 20 km². To represent the different ranges of precipitating cell intensity, seven thresholds are chosen: 2, 5, 10, 15, 20, 25 and 30 mm/h.

– Third step: *tracking of the cells*

Trajectories are built by identifying links between cells of different time steps. A complex algorithm mixing overlapping and correlation conditions is applied. The overlapping condition uses the cells on the image at time (t-1h) moved with the velocity calculated between the images at time (t-1h) and (t-2h) and compared to the cells on the image at time (t): if there is a cell on the image at time (t) overlapping the moved (t-1h) cell, with a criteria on the minimum recovery rate (15%), the matching is done. This condition based on the velocity allows the

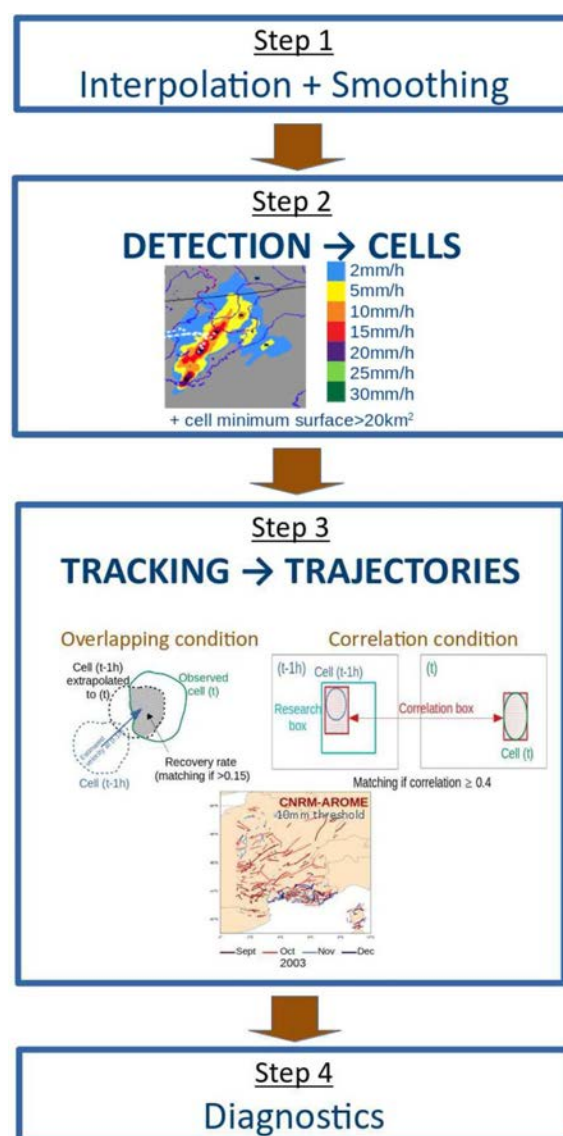


Fig. 18 Precipitating system detection and tracking algorithm

specificity of each cell in each meteorological situation to be taken into account. Another condition is based on spatial correlation calculation between the cells at time (t) and (t-1h) in a research box whose size varies accord-

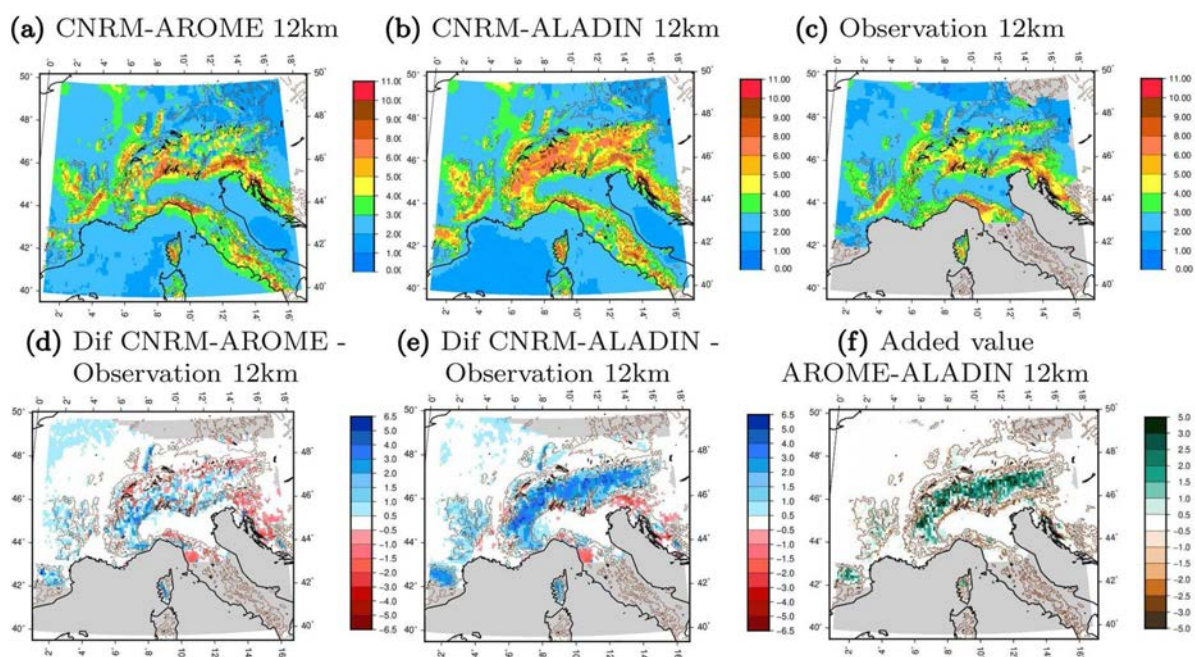


Fig. 19 Spatial distribution of the daily precipitation mean (mm/d) during an extended fall (SOND) for **a** CNRM-AROME, **b** CNRM-ALADIN and **c** observation for the 12 km grid. The second line presents **d**, **e** the differences between models and observation (mm/day)

and **f** the added value of CNRM-AROME compared to CNRM-ALADIN (mm/day). Added value is plotted in green if CNRM-AROME better than CNRM-ALADIN, in brown otherwise. On all figures, orography (500 m and 1000 m) is plotted in brown lines

ing to the size of the cell and the presence of potential fathers after the first overlapping condition: the match is done for the highest correlation rate found, with a minimum correlation of 0.4. An example of trajectories for CNRM-AROME for precipitating cells above 10 mm is given for the 2003 fall season in Fig. 18.

– Fourth step: *diagnostics*

For each threshold, the tool provides information about each cell schematized as an ellipse: centre of gravity,

length of the minor axis and the major axis, angle, velocity, area, mean and maximum intensity. A post-processing algorithm assembles the cells belonging to the same trajectory and calculates the main characteristics of each trajectory (duration, mean and maximum intensity, mean and maximum area,...). Diagnostics are computed for all tracks with minimum duration of one hour, minimum threshold of 2 mm/h and minimum area of 20 km².

D Spatial distribution of the daily precipitation mean and wet days

adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate

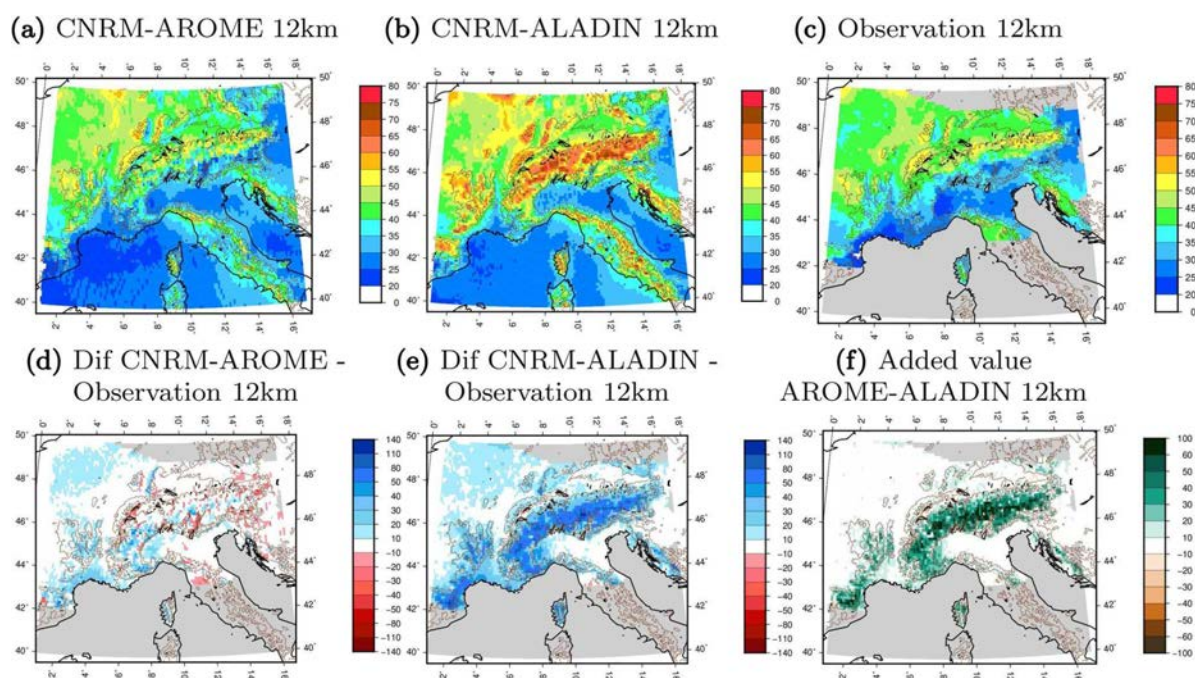


Fig. 20 Spatial distribution of the mean number of wet days (%) during an extended fall (SOND) for **a** CNRM-AROME, **b** CNRM-ALADIN and **c** observation for the 12 km grid. The second line presents **d**, **e** the relative differences between models and observation (%) and

f the added value of CNRM-AROME compared to CNRM-ALADIN (%). Added value is plotted in green if CNRM-AROME better than CNRM-ALADIN, in brown otherwise. On all figures, orography (500 m and 1000 m) is plotted in brown lines

Acknowledgements The authors gratefully acknowledge the WCRP-CORDEX-FPS on Convective phenomena at high resolution over Europe and the Mediterranean [FPSCONV-ALP-3]. This work is part of the Med-CORDEX initiative (<http://www.medcordex.eu>) and the HyMeX programme (<http://www.hymex.org>). This work has also been supported in part by the EUCP (European Climate Prediction System, <https://www.eucp-project.eu>) project. This EUCP project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under Grant Agreement No. 776613. The AROME model is a collaboration between CNRM/GMAP and CNRS laboratories involved in Meso-NH research, along with international ALADIN and HIRLAM consortia. The authors thank Isabelle Pfaffenzeller from Météo-France for providing the COMEPHORE dataset in netcdf format. They also thank MétéoSwiss for providing the observational datasets APGD-EURO4M and R_{DISAGG}H. They thank DWD for providing the RADKLIM dataset (RADKLIM Version 2017.002: Reprocessed gauge-adjusted radar data, one-hour precipitation sums (RW) DOI: 10.5676/DWD/RADKLIM_RW_V2017.002). They thank CETEMPS, University of L'Aquila for providing the GRIPHO dataset. They also wish to thank Aurelien Ribes (CNRM) for his advice about statistical aspects, Fabrice Chauvin (CNRM) and Sofia Darmaraki (Dalhousie University, Canada) for sharing their tracking post-processing scripts, and Yves Trambly (IRD) for his advice on hydrological aspects.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing,

if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

References

- Anagnostou MN, Nikolopoulos EI, Kalogiros J, Anagnostou EN, Marra F, Mair E, Bertoldi G, Tappeiner U, Borga M (2018) Advancing precipitation estimation and streamflow simulations in complex terrain with X-band dual-polarization radar observations. *Remote Sens* 10(8):1258. <https://doi.org/10.3390/rs10081258>
- Arbogast P, Pannekoucke O, Raynaud L, Lalanne R, Mémén E (2016) Object-oriented processing of CRM precipitation forecasts by stochastic filtering. *Q J R Meteorol Soc* 142(700):2827–2838. <https://doi.org/10.1002/qj.2871>
- Ban N, Schmidli J, Schär C (2014) Evaluation of the convection-resolving regional climate modeling approach in decade-long simulations. *J Geophys Res Atmos* 119(13):7889–7907. <https://doi.org/10.1002/2014JD021478>

- Ban N, Brisson E, Caillaud C, Coppola E, Pichelli E, Sobolowski S, Adinolfi M, Ahrens B, Anders I, Bastin S, Belusic D, Berthou S, et al. (2020) The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution, part I: Evaluation of precipitation. *Climate Dynamics*, under review
- Beaulant AL, Joly B, Nuissier O, Somot S, Ducrocq V, Joly A, Sevault F, Deque M, Ricard D (2011) Statistico-dynamical downscaling for mediterranean heavy precipitation. *Q J R Meteorol Soc* 137(656):736–748. <https://doi.org/10.1002/qj.796>
- Bechtold P, Bazile E (2001) The 12–13 november 1999 flash flood in southern france. *Atmos Res* 56(1–4):171–189. [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(00\)00097-1](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(00)00097-1)
- Bechtold P, Cuijpers J, Mascart P, Trouilhet P (1995) Modeling of trade wind cumuli with a low-order turbulence model: toward a unified description of Cu and Se clouds in meteorological models. *J Atmos Sci* 52(4):455–463. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1995\)052<0455:MOTWCW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1995)052<0455:MOTWCW>2.0.CO;2)
- Belamari S, Pirani A (2007) Validation of the optimal heat and momentum fluxes using the ORCA2-LIM global ocean-ice model. *Marine Environment and Security for the European Area—Integrated Project (MERSEA IP), Deliverable D 4*
- Belušić D, de Vries H, Dobler A, Landgren O, Lind P, Lindstedt D, Pedersen RA, Sánchez-Perrino JC, Toivonen E, van Ulft B et al (2020) HCLIM38: a flexible regional climate model applicable for different climate zones from coarse to convection-permitting scales. *Geosci Model Dev*. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-1311-2020>
- Bénard P, Vivoda J, Mašek J, Smolřková P, Yessad K, Smith C, Brožková R, Geleyn JF (2010) Dynamical kernel of the aladin-NH spectral limited-area model: revised formulation and sensitivity experiments. *Q J R Meteorol Soc* 136(646):155–169
- Berg P, Christensen OB, Klehmet K, Lenderink G, Olsson J, Teichmann C, Yang W (2019) Summertime precipitation extremes in a EURO-CORDEX 0.11 degrees ensemble at an hourly resolution. *Natl Haz Earth Syst Sci* 19(4):957–971. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-957-2019>
- Berthou S, Kendon EJ, Chan SC, Ban N, Leutwyler D, Schär C, Fosser G (2020) Pan-european climate at convection-permitting scale: a model intercomparison study. *Clim Dyn* 55:35–59. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4114-6>
- Beucher F, Lafore JP, Karbou F, Roca R (2014) High-resolution prediction of a major convective period over west Africa. *Q J R Meteorol Soc* 140(682):1409–1425. <https://doi.org/10.1002/qj.2225>
- Bony S, Stevens B, Frierson DM, Jakob C, Kageyama M, Pincus R, Shepherd TG, Sherwood SC, Siebesma AP, Sobel AH et al (2015) Clouds, circulation and climate sensitivity. *Nat Geosci* 8(4):261–268. <https://doi.org/10.1038/ngeo2398>
- Bosilovich MG, Chen J, Robertson FR, Adler RF (2008) Evaluation of global precipitation in reanalyses. *J Appl Meteorol Climatol* 47(9):2279–2299. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1921.1>
- Bougeault P (1985) A simple parameterization of the large-scale effects of cumulus convection. *Mon Weather Rev* 113(12):2108–2121. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1985\)113<2108:ASPOTL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1985)113<2108:ASPOTL>2.0.CO;2)
- Bougeault P, Lacarrere P (1989) Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model. *Mon Weather Rev* 117(8):1872–1890. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1872:POOITI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1872:POOITI>2.0.CO;2)
- Bouin MN, Lebeauin Brossier C (2020) Surface processes in the 7 november 2014 medicane from air–sea coupled high-resolution numerical modelling. *Atmos Chem Phys* 20(11):6861–6881
- Bouteloup Y, Seity Y, Bazile E (2011) Description of the sedimentation scheme used operationally in all Météo–France NWP models. *Tellus A* 63(2):300–311. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2010.00484.x>
- Bresson R, Ricard D, Ducrocq V (2009) Idealized mesoscale numerical study of Mediterranean heavy precipitating convective systems. *Meteorol Atmos Phys* 103(1–4):45–55. <https://doi.org/10.1007/s00703-008-0338-z>
- Bresson E, Ducrocq V, Nuissier O, Ricard D, de Saint-Aubin C (2012) Idealized numerical simulations of quasi-stationary convective systems over the Northwestern Mediterranean complex terrain. *Q J R Meteorol Soc* 138(668):1751–1763. <https://doi.org/10.1002/qj.1911>
- Brisson E, Van Weverberg K, Demuzere M, Devis A, Saeed S, Stengel M, van Lipzig NP (2016) How well can a convection-permitting climate model reproduce decadal statistics of precipitation, temperature and cloud characteristics? *Clim Dyn* 47(9–10):3043–3061. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3012-z>
- Brisson E, Brendel C, Herzog S, Ahrens B (2018) Lagrangian evaluation of convective shower characteristics in a convection-permitting model. *Meteorologische Zeitschrift*. <https://doi.org/10.1127/metz/2017/0817>
- Brousseau P, Seity Y, Ricard D, Léger J (2016) Improvement of the forecast of convective activity from the AROME-France system. *Q J R Meteorol Soc* 142(699):2231–2243. <https://doi.org/10.1002/qj.2822>
- Carabajal CC, Harding DJ, Boy JP, Danielson JJ, Gesch DB, Suchdeo VP (2011) Evaluation of the global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010) using ICESat geodetic control. In: *International Symposium on Lidar and Radar Mapping 2011: Technologies and Applications*, International Society for Optics and Photonics, vol 8286, p 82861Y. <https://doi.org/10.1117/12.912776>
- Chancibault K, Anquetin S, Ducrocq V, Saulnier GM (2006) Hydrological evaluation of high-resolution precipitation forecasts of the Gard flash-flood event (8–9 september 2002). *Q J R Meteorol Soc A J Atmos Sci Appl Meteorol Phys Oceanog* 132(617):1091–1117. <https://doi.org/10.1256/qj.04.164>
- Charnock H (1955) Wind stress on a water surface. *Q J R Meteorol Soc* 81(350):639–640. <https://doi.org/10.1002/qj.49708135027>
- Colin J, Déqué M, Radu R, Somot S (2010) Sensitivity study of heavy precipitation in limited area model climate simulations: influence of the size of the domain and the use of the spectral nudging technique. *Tellus A* 62(5):591–604. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2010.00467.x>
- Coppola E, Sobolowski S, Pichelli E, Raffaele F, Ahrens B, Anders I, Ban N, Bastin S, Belda M, Belusic D et al (2020b) A first-of-its-kind multi-model convection permitting ensemble for investigating convective phenomena over Europe and the Mediterranean. *Clim Dyn* 55:3–34. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4521-8>
- Coppola E, Nogherotto R, M Ciarlo J, Giorgi F, Somot S, Nabat P, Corre L, B Christensen O, Boberg F, van Meijgaard E, Aalbers E, Schwingshackl C, et al. (2020a) Assessment of the European climate projections as simulated by the large EURO-CORDEX regional climate model ensemble. *Climate Dynamics*, under review
- Cornes RC, van der Schrier G, van den Besselaar EJ, Jones PD (2018) An ensemble version of the E-OBS temperature and precipitation data sets. *J Geophys Res Atmos* 123(17):9391–9409. <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>
- Crook J, Klein C, Folwell S, Taylor CM, Parker DJ, Stratton R, Stein T (2019) Assessment of the representation of West African storm lifecycles in convection-permitting simulations. *Earth Space Sci* 6(5):818–835. <https://doi.org/10.1029/2018EA000491>
- Cuxart J, Bougeault P, Redelsperger JL (2000) A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations. *Q J R Meteorol Soc* 126(562):1–30. <https://doi.org/10.1002/qj.49712656202>
- Daniel M, Lemonsu A, Déqué M, Somot S, Alias A, Masson V (2019) Benefits of explicit urban parameterization in regional climate

- modeling to study climate and city interactions. *Clim Dyn*. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4289-x>
- Darmaraki S, Somot S, Sevault F, Nabat P (2019) Past variability of Mediterranean Sea marine heatwave. *Geophys Res Lett* 46(16):9813–9823. <https://doi.org/10.1029/2019GL082933>
- Davis C, Brown B, Bullock R (2006) Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: methodology and application to mesoscale rain areas. *Mon Weather Rev* 134(7):1772–1784. <https://doi.org/10.1175/MWR3145.1>
- Davis CA, Brown BG, Bullock R, Halley-Gotway J (2009) The method for object-based diagnostic evaluation (MODE) applied to numerical forecasts from the 2005 NSSL/SPC Spring Program. *Weather Forecast* 24(5):1252–1267. <https://doi.org/10.1175/2009WAF2222241.1>
- Dee DP, Uppala S, Simmons A, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balmaseda M, Balsamo G, Bauer dP et al (2011) The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q J R Meteorol Soc* 137(656):553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- Delrieu G, Nicol J, Yates E, Kirstetter PE, Creutin JD, Anquetin S, Obled C, Saulnier GM, Ducrocq V, Gaume E et al (2005) The catastrophic flash-flood event of 8–9 september 2002 in the Gard Region, France: a first case study for the Cévennes-Vivarais Mediterranean Hydrometeorological Observatory. *J Hydrometeorol* 6(1):34–52. <https://doi.org/10.1175/JHM-400.1>
- Déqué M, Somot S (2008) Analysis of heavy precipitation for France using high resolution ALADIN RCM simulations. *Időjárás Q J Hung Meteorol Serv* 112(3–4):179–190
- Déqué M, Alias A, Somot S, Nuissier O (2016) Climate change and extreme precipitation: the response by a convection-resolving model. In: Research activities in atmospheric and oceanic modelling CAS/JSC Working group on numerical experimentation Report No. 46
- Di Luca A, de Elía R, Laprise R (2013) Potential for small scale added value of RCM's downscaled climate change signal. *Clim Dyn* 40(3–4):601–618. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1415-z>
- Douville H, Royer JF, Mahfouf JF (1995) A new snow parameterization for the Meteo-France climate model. *Clim Dyn* 12(1):21–35
- Drobinski P, Ducrocq V, Alpert P, Anagnostou E, Béranger K, Borga M, Braud I, Chanzy A, Davolio S, Delrieu G et al (2014) HyMeX: a 10-year multidisciplinary program on the Mediterranean water cycle. *Bull Am Meteorol Soc* 95(7):1063–1082. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00242.1>
- Ducrocq V, Nuissier O, Ricard D, Lebeaupin C, Thouvenin T (2008) A numerical study of three catastrophic precipitating events over southern France. II: Mesoscale triggering and stationarity factors. *Q J R Meteorol Soc* 134(630):131–145. <https://doi.org/10.1002/qj.199>
- Ducrocq V, Braud I, Davolio S, Ferretti R, Flamant C, Jansa A, Kalthoff N, Richard E, Taupier-Letage I, Ayrat PA et al (2014) HyMeX-SOP1: the field campaign dedicated to heavy precipitation and flash flooding in the northwestern Mediterranean. *Bull Am Meteorol Soc* 95(7):1083–1100. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00244>
- Ducrocq V, Ricard D, Lafore JP, Orain F (2002) Storm-scale numerical rainfall prediction for five precipitating events over France: On the importance of the initial humidity field. *Weather Forecast* 17(6):1236–1256. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2002\)017<1236:SSNRPF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2002)017<1236:SSNRPF>2.0.CO;2)
- Duffourg F, Ducrocq V (2011) Origin of the moisture feeding the heavy precipitating systems over southeastern France. *Natl Haz Earth Syst Sci* 11(4):1163. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1163-2011>
- Duffourg F, Ducrocq V (2013) Assessment of the water supply to Mediterranean heavy precipitation: a method based on finely designed water budgets. *Atmos Sci Lett* 14(3):133–138. <https://doi.org/10.1002/asl2.429>
- Duffourg F, Nuissier O, Ducrocq V, Flamant C, Chazette P, Delanoë J, Doerenbecher A, Fourrié N, Di Girolamo P, Lac C et al (2016) Offshore deep convection initiation and maintenance during the HyMeX IOP 16a heavy precipitation event. *Q J R Meteorol Soc* 142(S1):259–274
- Durand Y, Brun E, Méridol L, Guyomarc'h G, Lesaffre B, Martin E (1993) A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Ann Glaciol* 18:65–71. <https://doi.org/10.3189/S0260305500011277>
- Fairall C, Bradley EF, Hare J, Grachev A, Edson J (2003) Bulk parameterization of air-sea fluxes: updates and verification for the COARE algorithm. *J Clim* 16(4):571–591. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<0571:BPOASF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<0571:BPOASF>2.0.CO;2)
- Fantini A (2019) Climate change impact on flood hazard over Italy. PhD thesis, Università degli Studi di Trieste. <http://hdl.handle.net/11368/2940009>
- Fantini A, Raffaele F, Torma C, Bacer S, Coppola E, Giorgi F, Ahrens B, Dubois C, Sanchez E, Verdecchia M (2018) Assessment of multiple daily precipitation statistics in ERA-Interim driven Med-CORDEX and EURO-CORDEX experiments against high resolution observations. *Clim Dyn* 51(3):877–900. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3453-4>
- Fioleau T, Roca R (2013) An algorithm for the detection and tracking of tropical mesoscale convective systems using infrared images from geostationary satellite. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 51(7):4302–4315. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2227762>
- Fitzpatrick RG, Parker DJ, Marsham JH, Rowell DP, Guichard FM, Taylor CM, Cook KH, Vizy EK, Jackson LS, Finney D et al (2020) What drives the intensification of mesoscale convective systems over the West African Sahel under climate change? *J Clim* 33(8):3151–3172. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0380.1>
- Flaounas E, Drobinski P, Borga M, Calvet JC, Delrieu G, Morin E, Tartari G, Toffolon R (2012) Assessment of gridded observations used for climate model validation in the Mediterranean region: the HyMeX and Med-CORDEX framework. *Environ Res Lett* 7(2):024017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024017>
- Fosser G, Khodayar S, Berg P (2015) Benefit of convection permitting climate model simulations in the representation of convective precipitation. *Clim Dyn* 44(1–2):45–60. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2242-1>
- Fouquart Y, Bonnel B (1980) Computations of solar heating of the earth's atmosphere—a new parameterization. *Beitraege zur Physik der Atmosphaere* 53:35–62
- Friedlingstein P, Jones M, O'sullivan M, Andrew R, Hauck J, Peters G, Peters W, Pongratz J, Sitch S, Le Quéré C et al (2019) Global carbon budget 2019. *Earth Syst Sci Data* 11(4):1783–1838. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>
- Fumière Q (2019) Changement climatique et précipitations extrêmes : apport des modèles résolvant la convection. PhD thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse III
- Fumière Q, Déqué M, Nuissier O, Somot S, Alias A, Caillaud C, Laurantin O, Seity Y (2020) Extreme rainfall in Mediterranean France during the fall: added value of the CNRM-AROME convection-permitting regional climate model. *Clim Dyn* 55:77–91. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04898-8>
- Gaume E, Livet M, Desbordes M, Villeneuve JP (2004) Hydrological analysis of the river Aude, France, flash flood on 12 and 13 November 1999. *J Hydrol* 286(1–4):135–154. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.09.015>
- Giorgi F (2019) Thirty years of regional climate modeling: where are we and where are we going next? *J Geophys Res Atmos* 124(11):5696–5723. <https://doi.org/10.1029/2018JD030094>
- Giorgi F, Torma C, Coppola E, Ban N, Schär C, Somot S (2016) Enhanced summer convective rainfall at alpine high elevations in

- response to climate warming. *Nat Geosci* 9(8):584–589. <https://doi.org/10.1038/ngeo2761>
- Giorgi F, Bates GT (1989) The climatological skill of a regional model over complex terrain. *Mon Weather Rev* 117(11):2325–2347. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<2325:TCSOAR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<2325:TCSOAR>2.0.CO;2)
- Guérémy J (2011) A continuous buoyancy based convection scheme: one-and three-dimensional validation. *Tellus A Dyn Meteorol Oceanogr* 63(4):687–706
- Gustafsson N, Janjić T, Schraff C, Leuenberger D, Weissmann M, Reich H, Brousseau P, Montmerle T, Wattrelot E, Bučánek A et al (2018) Survey of data assimilation methods for convective-scale numerical weather prediction at operational centres. *Q J R Meteorol Soc* 144(713):1218–1256. <https://doi.org/10.1002/qj.3179>
- Haberlie AM, Ashley WS (2019) Climatological representation of mesoscale convective systems in a dynamically downscaled climate simulation. *Int J Climatol* 39(2):1144–1153. <https://doi.org/10.1002/joc.5880>
- Haylock M, Hofstra N, Klein Tank A, Klok E, Jones P, New M (2008) A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *J Geophys Res Atmos*. <https://doi.org/10.1029/2008JD010201>
- Hernandez E, Cana L, Diaz J, Garcia R, Gimeno L (1998) Mesoscale convective complexes over the western Mediterranean area during 1990–1994. *Meteorol Atmos Phys* 68(1–2):1–12. <https://doi.org/10.1007/BF01025379>
- Herrmann M, Somot S, Calmanti S, Dubois C, Sevault F (2011) Representation of spatial and temporal variability of daily wind speed and of intense wind events over the Mediterranean Sea using dynamical downscaling: impact of the regional climate model configuration. *Natl Haz Earth Sys Sci* 11:1983–2001. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1983-2011>
- Hofstra N, New M, McSweeney C (2010) The influence of interpolation and station network density on the distributions and trends of climate variables in gridded daily data. *Clim Dyn* 35(5):841–858. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0698-1>
- Hohenegger C, Brockhaus P, Schaer C (2008) Towards climate simulations at cloud-resolving scales. *Meteorologische Zeitschrift* 17(4):383–394. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0303>
- Hong SY, Kanamitsu M (2014) Dynamical downscaling: fundamental issues from an NWP point of view and recommendations. *Asia-Pacific J Atmos Sci* 50(1):83–104. <https://doi.org/10.1007/s13143-014-0029-2>
- Hou AY, Azarbarzin AA, Kakar RK, Neeck S (2011) The global precipitation measurement (GPM) mission: overview and US status
- Huffman GJ, Adler RF, Bolvin DT, Nelkin EJ (2010) The TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA). In: *Satellite rainfall applications for surface hydrology*, Springer, pp 3–22
- Iacono MJ, Delamere JS, Mlawer EJ, Shephard MW, Clough SA, Collins WD (2008) Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models. *J Geophys Res Atmos*. <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>
- Isotta FA, Frei C, Weigluni V, Perčec Tadić M, Lassegues P, Rudolf B, Pavan V, Cacciamani C, Antolini G, Ratto SM et al (2014) The climate of daily precipitation in the Alps: development and analysis of a high-resolution grid dataset from pan-Alpine rain-gauge data. *Int J Climatol* 34(5):1657–1675. <https://doi.org/10.1002/joc.3794>
- Ivusic S, Güttler I, Horvath K, Somot S, Guérémy JF, Alias A (2020) Precipitation over the Dinaric Alps: an evaluation of regional climate model. In preparation
- Jacob D, Petersen J, Eggert B, Alias A, Christensen OB, Bouwer LM, Braun A, Colette A, Déqué M, Georgievski G et al (2014) EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg Environ Change* 14(2):563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0587-y>
- Johnson RH, Ciesielski PE (2020) Potential vorticity generation by west African squall lines. *Mon Weather Rev* 148(4):1691–1715
- Joyce RJ, Janowiak JE, Arkin PA, Xie P (2004) CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *J Hydrometeorol* 5(3):487–503. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2004\)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2004)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2)
- Kendon EJ, Roberts NM, Fowler HJ, Roberts MJ, Chan SC, Senior CA (2014) Heavier summer downpours with climate change revealed by weather forecast resolution model. *Nat Clim Change* 4(7):570–576. <https://doi.org/10.1038/nclimate2258>
- Khodayar S, Fossier G, Berthou S, Davolio S, Drobinski P, Ducrocq V, Ferretti R, Nuret M, Pichelli E, Richard E et al (2016) A seamless weather-climate multi-model intercomparison on the representation of a high impact weather event in the western Mediterranean: HyMeX IOP12. *Q J R Meteorol Soc* 142:433–452. <https://doi.org/10.1002/qj.2700>
- Knist S, Goergen K, Simmer C (2020) Evaluation and projected changes of precipitation statistics in convection-permitting WRF climate simulations over Central Europe. *Clim Dyn* 55:325–341. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4147-x>
- Kotlarski S, Szabó P, Herrera S, Rätty O, Keuler K, Soares PM, Cardoso RM, Bosshard T, Pagé C, Boberg F et al (2019) Observational uncertainty and regional climate model evaluation: a pan-European perspective. *Int J Climatol* 39(9):3730–3749. <https://doi.org/10.1002/joc.5249>
- Krichak SO, Barkan J, Breitgand JS, Gualdi S, Feldstein SB (2015) The role of the export of tropical moisture into midlatitudes for extreme precipitation events in the Mediterranean region. *Theor Appl Climatol* 121(3–4):499–515. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1244-6>
- Lac C, Chaboureaud JP, Masson V, Pinty JP, Tulet P, Escobar J, Leriche M, Barthe C, Aouizerats B, Augros C et al (2018) Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications. *Geosci Model Dev* 11(5):1929–1969. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1929-2018>
- Lafore JP, Stein J, Asencio N, Bougeault P, Ducrocq V, Duron J, Fischer C, Hérelil P, Mascart P, Masson V, Pinty JP, Redelsperger JL, Richard E, Vilà-Guerau de Arellano J (1998) The Meso-NH atmospheric simulation system. part I: adiabatic formulation and control simulations. *Annales Geophysicae* 16(1):90–109. <https://doi.org/10.1007/s00585-997-0090-6>
- Laprise R, De Elia R, Caya D, Biner S, Lucas-Picher P, Diaconescu E, Leduc M, Alexandru A, Separovic L et al (2008) Challenging some tenets of regional climate modelling. *Meteorol Atmos Phys* 100(1–4):3–22. <https://doi.org/10.1007/s00703-008-0292-9>
- Lascaux F, Richard E, Pinty JP (2006) Numerical simulations of three different MAP IOPs and the associated microphysical processes. *Q J R Meteorol Soc J Atmos Sci Appl Meteorol Phys Oceanogr* 132(619):1907–1926. <https://doi.org/10.1256/qj.05.197>
- Lassegues P (2018) Daily and climatological fields of precipitation over the western Alps with a high density network for the period of 1990–2012. *Theor Appl Climatol* 131(1–2):1–17. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1954-z>
- Laurantin O (2008) ANTILOPE: Hourly rainfall analysis merging radar and rain gauge data. In: *Proceedings of the International Symposium on Weather Radar and Hydrology*, pp 2–8
- Lean HW, Clark PA, Dixon M, Roberts NM, Fitch A, Forbes R, Halliwell C (2008) Characteristics of high-resolution versions of the Met Office Unified Model for forecasting convection over the UK. *Mon Weather Rev* 136(9):3408–3424. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2332.1>
- Lebeaupin Brossier C, Ducrocq V, Giordani H (2008) Sensitivity of three mediterranean heavy rain events to two different sea surface

- fluxes parameterizations in high-resolution numerical modeling. *J Geophys Res Atmos*. <https://doi.org/10.1029/2007JD009613>
- Lenderink G (2010) Exploring metrics of extreme daily precipitation in a large ensemble of regional climate model simulations. *Clim Res* 44(2–3):151–166. <https://doi.org/10.3354/cr00946>
- Leutwyler D, Lüthi D, Ban N, Fuhrer O, Schär C (2017) Evaluation of the convection-resolving climate modeling approach on continental scales. *J Geophys Res Atmos* 122(10):5237–5258. <https://doi.org/10.1002/2016JD026013>
- Li L, Li Y, Li Z (2020) Object-based tracking of precipitation systems in western Canada: the importance of temporal resolution of source data. *Clim Dyn*:1–17
- Lind P, Lindstedt D, Kjellström E, Jones C (2016) Spatial and temporal characteristics of summer precipitation over central Europe in a suite of high-resolution climate models. *J Clim* 29(10):3501–3518. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4114-6>
- Lind P, Belušić D, Christensen OB, Dobler A, Kjellström E, Landgren O, Lindstedt D, Matte D, Pedersen RA, Toivonen E et al (2020) Benefits and added value of convection-permitting climate modeling over fennoscandinavia. *Clim Dyn* 55(7):1893–1912
- Luu LN, Vautard R, Yiou P, van Oldenborgh GJ, Lenderink G (2018) Attribution of Extreme Rainfall Events in the South of France Using EURO-CORDEX Simulations. *Geophysical Research Letters* 45(12):6242–6250. <https://doi.org/10.1029/2018GL077807>
- Malardel S, Ricard D (2015) An alternative cell-averaged departure point reconstruction for pointwise semi-Lagrangian transport schemes. *Q J R Meteorol Soc* 141(691):2114–2126. <https://doi.org/10.1002/qj.2509>
- Masson V (2000) A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorol* 94(3):357–397. <https://doi.org/10.1023/A:1002463829265>
- Masson V, Seity Y (2009) Including atmospheric layers in vegetation and urban offline surface schemes. *J Appl Meteorol Climatol* 48(7):1377–1397. <https://doi.org/10.1175/2009JAMC1866.1>
- Masson V, Champeaux JL, Chauvin F, Meriguet C, Lacaze R (2003) A global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models. *J Clim* 16(9):1261–1282. <https://doi.org/10.1175/1520-0442-16.9.1261>
- Masson V, Le Moigne P, Martin E, Faroux S, Alias A, Alkama R, Belamari S, Barbu A, Boone A, Bouyssel F et al (2013) The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geosci Model Dev* 6:929–960
- Matte D, Laprise R, Thériault JM (2016) Comparison between high-resolution climate simulations using single-and double-nesting approaches within the big-brother experimental protocol. *Clim Dyn* 47(12):3613–3626. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3031-9>
- Matte D, Laprise R, Thériault JM, Lucas-Picher P (2017) Spatial spin-up of fine scales in a regional climate model simulation driven by low-resolution boundary conditions. *Clim Dyn* 49(1–2):563–574. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3358-2>
- Meredith EP, Rust HW, Ulbrich U (2018) A classification algorithm for selective dynamical downscaling of precipitation extremes. *Hydrol Earth Syst Sci* 22(8):4183–4200. <https://doi.org/10.17169/refubium-598>
- Mlawer EJ, Taubman SJ, Brown PD, Iacono MJ, Clough SA (1997) Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J Geophys Res Atmos* 102(D14):16663–16682. <https://doi.org/10.1029/97JD02037>
- Morcrette JJ (2001) The surface downward longwave radiation in the ECMWF forecast system. *J Clim* 15(14):1875–1892. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<1875:TSDLRI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<1875:TSDLRI>2.0.CO;2)
- Morel C, Senesi S (2002a) A climatology of mesoscale convective systems over Europe using satellite infrared imagery I: Methodology. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: a journal of the atmospheric sciences. Appl Meteorol Phys Oceanogr* 128(584):1953–1971. <https://doi.org/10.1256/003590002320603485>
- Morel C, Senesi S (2002b) A climatology of mesoscale convective systems over Europe using satellite infrared imagery. II: characteristics of European mesoscale convective systems. *Q J R Meteorol Soc J Atmos Sci Appl Meteorol Phys Oceanogr* 128(584):1973–1995. <https://doi.org/10.1256/003590002320603494>
- Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, Van Vuuren DP, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T et al (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463(7282):747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Nabat P, Somot S, Mallet M, Chiappello I, Morcrette J, Solmon F, Szopa S, Dulac F, Collins W, Ghan S et al (2013) A 4-D climatology (1979–2009) of the monthly tropospheric aerosol optical depth distribution over the Mediterranean region from a comparative evaluation and blending of remote sensing and model products. *Atmos Measure Tech* 6(5):1287–1314. <https://doi.org/10.5194/amt-6-1287-2013>
- Nabat P, Somot S, Cassou C, Mallet M, Michou M, Bouniol D, Decharme B, Drugé T, Roehrig R, Saint-Martin D (2020) Modulation of radiative aerosols effects by atmospheric circulation over the Euro-Mediterranean region. *Atmos Chem Phys Discuss*
- Najac J, Boé J, Terray L (2009) A multi-model ensemble approach for assessment of climate change impact on surface winds in France. *Clim Dyn* 32(5):615–634. <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0440-4>
- Neff EL (1977) How much rain does a rain gage gage? *J Hydrol* 35(3–4):213–220. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(77\)90001-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(77)90001-4)
- Noilhan J, Planton S (1989) A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon Weather Rev* 117(3):536–549. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<0536:ASPOLS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<0536:ASPOLS>2.0.CO;2)
- Nuissier O, Ducrocq V, Ricard D, Lebeaupin C, Anquetin S (2008) A numerical study of three catastrophic precipitating events over southern France. I: Numerical framework and synoptic ingredients. *Q J R Meteorol Soc* 134(630):111–130. <https://doi.org/10.1002/qj.200>
- Nuissier O, Joly B, Joly A, Ducrocq V, Arbogast P (2011) A statistical downscaling to identify the large-scale circulation patterns associated with heavy precipitation events over southern France. *Q J R Meteorol Soc* 137(660):1812–1827. <https://doi.org/10.1002/qj.866>
- Parker WS (2016) Reanalyses and observations: what's the difference? *Bull Am Meteorol Soc* 97(9):1565–1572
- Pergaud J, Masson V, Malardel S, Couvreur F (2009) A parameterization of dry thermals and shallow cumuli for mesoscale numerical weather prediction. *Boundary-Layer Meteorol* 132(1):83–106
- Pichelli E, Coppola E, Sobolowski S, Ban N, Giorgi F, Stocchi P, Alias A, Belušić D, Berthou S, Caillaud C, M Cardoso R, Chan S, et al. (2020) The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution part 2: future precipitation projections. *Clim Dyn* (Under Review)
- Pinty JP, Jabouille P (1998) A mixed-phased cloud parameterization for use in a mesoscale non-hydrostatic model: simulations of a squall line and of orographic precipitation. In: *Conference on Cloud Physics: 14th Conference on Planned and Inadvertent Weather Modification*, pp 17–21
- Piriou JM, Redelsperger JL, Geleyn JF, Lafore JP, Guichard F (2007) An approach for convective parameterization with memory: separating microphysics and transport in grid-scale equations. *J Atmos Sci* 64(11):4127–4139

- Ponzano M, Jolly B, Descamps L, Arbogast P (2020) Systematic errors analysis of heavy precipitating events prediction using a 30-year hindcast dataset. *NHESS* 20:1369–1389
- Prein AF, Gobiet A (2017) Impacts of uncertainties in european gridded precipitation observations on regional climate analysis. *Int J Climatol* 37(1):305–327
- Prein A, Gobiet A, Suklitsch M, Truhetz H, Awan N, Keuler K, Georgievski G (2013) Added value of convection permitting seasonal simulations. *Clim Dyn* 41(9–10):2655–2677
- Prein AF, Langhans W, Fosser G, Ferrone A, Ban N, Goergen K, Keller M, Tölle M, Gutjahr O, Feser F et al (2015) A review on regional convection-permitting climate modeling: demonstrations, prospects, and challenges. *Rev Geophys* 53(2):323–361
- Prein A, Gobiet A, Truhetz H, Keuler K, Goergen K, Teichmann C, Maule CF, Van Meijgaard E, Déqué M, Nikulin G et al (2016) Precipitation in the euro-cordex 0.11° and 0.44° simulations: high resolution, high benefits? *Clim Dyn* 46(1–2):383–412
- Prein AF, Liu C, Ikeda K, Bullock R, Rasmussen RM, Holland GJ, Clark M (2020) Simulating North American mesoscale convective systems with a convection-permitting climate model. *Clim Dyn* 55:95–110. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3993-2>
- Quintana-Segui P, Le Moigne P, Durand Y, Martin E, Habets F, Bailion M, Canellas C, Franchisteguy L, Morel S (2008) Analysis of near-surface atmospheric variables: validation of the SAFRAN analysis over France. *J Appl Meteorol Climatol* 47(1):92–107
- Radu R, Déqué M, Somot S (2008) Spectral nudging in a spectral regional climate model. *Tellus A Dyn Meteorol Oceanogr* 60(5):898–910
- Rainaud R, Brossier CL, Ducrocq V, Giordani H (2017) High-resolution air–sea coupling impact on two heavy precipitation events in the Western Mediterranean. *Q J R Meteorol Soc* 143(707):2448–2462. <https://doi.org/10.1002/qj.3098>
- Rajczak J, Schär C (2017) Projections of future precipitation extremes over Europe: a multimodel assessment of climate simulations. *J Geophys Res Atmos* 122(20):10–773
- Raynaud L, Pechin I, Arbogast P, Rottner L, Destouches M (2019) Object-based verification metrics applied to the evaluation and weighting of convective-scale precipitation forecasts. *Q J R Meteorol Soc* 145(722):1992–2008
- Reder A, Raffa M, Montesarchio M, Mercogliano P, et al. (2020) Performance evaluation of regional climate model simulations at different spatial and temporal scales over the complex orography area of the Alpine region. *Natl Haz J Int Soc Prevent Mitigat Natl Haz*:1–27
- Ribes A, Thao S, Vautard R, Dubuisson B, Somot S, Colin J, Planton S, Soubeyroux JM (2019) Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean. *Clim Dyn*:1–20
- Ricard D, Ducrocq V, Auger L (2012) A climatology of the mesoscale environment associated with heavily precipitating events over a northwestern Mediterranean area. *J Appl Meteorol Climatol* 51(3):468–488
- Ricard D, Lac C, Riette S, Legrand R, Mary A (2013) Kinetic energy spectra characteristics of two convection-permitting limited-area models AROME and Meso-NH. *Q J R Meteorol Soc* 139(674):1327–1341
- Richard E, Buzzi A, Zängl G (2007) Quantitative precipitation forecasting in the Alps: the advances achieved by the Mesoscale Alpine Programme. *Q J R Meteorol Soc* 133(625):831–846
- Roger L (2018) Validation et utilisation climatologiques de la ré-analyse de lame d'eau radar Comephore étendue. Master's thesis, Ecole Nationale de la Météorologie, Météo-France
- Rottner L, Arbogast P, Destouches M, Hamidi Y, Raynaud L (2019) The similarity-based method: a new object detection method for deterministic and ensemble weather forecasts. *Adv Scie Res* 16:209–213
- Ruti PM, Somot S, Giorgi F, Dubois C, Flaounas E, Obermann A, Dell'Aquila A, Pisacane G, Harzallah A, Lombardi E et al (2016) MED-CORDEX initiative for Mediterranean climate studies. *Bull Am Meteorol Soc* 97(7):1187–1208
- Saltikoff E, Haase G, Delobbe L, Gaussiat N, Martet M, Idziorek D, Leijnse H, Novák P, Lukach M, Stephan K (2019) OPERA the radar project. *Atmosphere* 10(6):320
- Sanchez-Gomez E, Somot S, Déqué M (2009) Ability of an ensemble of regional climate models to reproduce weather regimes over Europe-Atlantic during the period 1961–2000. *Clim Dyn* 33(5):723–736
- Schär C, Ban N, Fischer EM, Rajczak J, Schmidli J, Frei C, Giorgi F, Karl TR, Kendon EJ, Tank AMK et al (2016) Percentile indices for assessing changes in heavy precipitation events. *Clim Change* 137(1–2):201–216
- Seity Y, Brousseau P, Malardel S, Hello G, Bénard P, Bouttier F, Lac C, Masson V (2011) The AROME-France convective-scale operational model. *Mon Weather Rev* 139(3):976–991
- Senkova A, Rontu L, Savijärvi H (2007) Parametrization of orographic effects on surface radiation in HIRLAM. *Tellus A Dyn Meteorol Oceanogr* 59(3):279–291
- Skamarock WC (2004) Evaluating mesoscale NWP models using kinetic energy spectra. *Mon Weather Rev* 132(12):3019–3032
- Spiridonov V, Déqué M, Somot S (2005) ALADIN-CLIMATE: from the origins to present date. *ALADIN Newsletter* 29:89–92
- Stein TH, Hogan RJ, Hanley KE, Nicol JC, Lean HW, Plant RS, Clark PA, Halliwell CE (2014) The three-dimensional morphology of simulated and observed convective storms over southern England. *Mon Weather Rev* 142(9):3264–3283. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00372.1>
- Stein TH, Hogan RJ, Clark PA, Halliwell CE, Hanley KE, Lean HW, Nicol JC, Plant RS (2015) The DYMECS project: a statistical approach for the evaluation of convective storms in high-resolution NWP models. *Bull Am Meteorol Soc* 96(6):939–951
- Survey UG (1993) Digital elevation models, data users guide 5. Reston, Virginia, US Geological Survey pp 1–50
- Tabary P, Dupuy P, Lhenaff G, Gueguen C, Moulin L, Laurantin O, Merlier C, Soubeyroux JM (2012) A 10-year (1997–2006) reanalysis of Quantitative Precipitation Estimation over France: methodology and first results. In: IAHS-AISH publication, pp 255–260
- Termonia P, Fischer C, Bazile E, Bouysse F, Brožková R, Bénard P, Bochenek B, Degrauwe D, Derková M, El Khatib R et al (2018) The ALADIN system and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. *Geosci Model Dev* 11(1):257
- Toreti A, Xoplaki E, Maraun D, Kuglitsch FG, Wanner H, Luterbacher J (2010) Characterisation of extreme winter precipitation in Mediterranean coastal sites and associated anomalous atmospheric circulation patterns. *Natl Haz Earth Syst Sci* 10(5):1037–1050
- Torma C, Giorgi F, Coppola E (2015) Added value of regional climate modeling over areas characterized by complex terrain-Precipitation over the Alps. *J Geophys Res Atmos* 120(9):3957–3972
- Vautard R, Yiou P, van Oldenborgh GJ, Lenderink G, Thao S, Ribes A, Planton S, Dubuisson B, Soubeyroux JM (2015) Extreme fall 2014 precipitation in the Cévennes mountains. *Bull Am Meteorol Soc* 96(12):S56–S60
- Vidal JP, Martin E, Franchistéguy L, Bailion M, Soubeyroux JM (2011) A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *Int J Climatol* 30(11):1627–1644
- von Storch H, Langenberg H, Feser F (2000) A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes. *Mon Weather Rev* 128(10):3664–3673
- Winterrath T, Brendel C, Hafer M, Junghänel T, Klameth A, Walawender E, Weigl E, Becker A (2017) Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie

- Wüest M, Frei C, Altenhoff A, Hagen M, Litschi M, Schär C (2010) A gridded hourly precipitation dataset for Switzerland using rain-gauge analysis and radar-based disaggregation. *Int J Climatol* 30(12):1764–1775
- Yang D, Ishida S, Goodison BE, Gunther T (1999) Bias correction of daily precipitation measurements for Greenland. *J Geophys Res Atmos* 104(D6):6171–6181
- Yu N, Gaussiat N, Tabary P (2018) Polarimetric x-band weather radars for quantitative precipitation estimation in mountainous regions. *Q J R Meteorol Soc* 144(717):2603–2619
- Zolina O, Simmer C, Kapala A, Shabanov P, Becker P, Mächel H, Gulev S, Groisman P (2014) Precipitation variability and extremes in central Europe: new view from STAMMEX results. *Bull Am Meteorol Soc* 95(7):995–1002

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

2251 **3.1.3 Complément pour l'évaluation de CNRM-AROME**

2252 Plus généralement, j'ai pu participer, au cours de ma thèse, à d'autres études d'éva-
2253 luation à partir de simulations utilisant la même version de CNRM-AROME. Ces études
2254 ont pu démontrer la valeur ajoutée du modèle par rapport au RCM CNRM-ALADIN
2255 pour d'autres paramètres. Sur les Alpes, Monteiro et al (2022) ont mis en évidence une
2256 réduction du biais froid, une meilleure représentation des précipitations et de leur variabi-
2257 lité spatiale par le CP-RCM. Lemonsu et al (2023) et Michau et al (2023a) ont montré la
2258 bonne représentation du climat urbain par CNRM-AROME pour les principales grandes
2259 villes françaises. Lucas-Picher et al (2023) ont réalisé une évaluation plus exhaustive de
2260 CNRM-AROME sur le domaine Nord-Ouest de l'Europe et ont trouvé la valeur ajoutée la
2261 plus forte par rapport à CNRM-ALADIN pour la représentation du cycle diurne estival de
2262 précipitation et pour les extrêmes de précipitation en toutes saisons.

2263 Ces études ont également permis de mettre en évidence d'autres biais systématiques du
2264 modèle dont les principaux sont les suivants : une surestimation des cumuls de précipitation
2265 en hiver et surtout au printemps s'accompagnant d'un biais froid au printemps, un biais
2266 chaud en été, lié à une surestimation du rayonnement courtes longueurs d'ondes entrant
2267 venant d'une sous-estimation de la couverture nuageuse, un biais froid et une possible
2268 surestimation des précipitations sur le relief, ainsi qu'une accumulation de neige irréaliste
2269 à haute altitude (> 2000 m).

2270 **3.2 Evaluation de l'ensemble de CP-RCMs du FPS** 2271 **Convection pour la simulation des épisodes médi-** 2272 **terranéens**

2273 **3.2.1 Approche eulérienne**

2274 Comme pour l'évaluation de CNRM-AROME et avant de passer à l'analyse orien-
2275 tée objet, cette première partie présente une évaluation avec des statistiques eulériennes
2276 classiques pour les précipitations des simulations d'évaluation (2000-2009) de l'ensemble
2277 multi-modèle du FPS Convection sur le domaine pan-alpin. Cette étude, pilotée par Niko-
2278 lina Ban (ETHZ et maintenant, University of Innsbruck), a été réalisée en collaboration
2279 avec les différents groupes de recherche qui ont interpolé leurs données sur la grille régu-
2280 lière ALP-3i, puis calculé les différents indicateurs climatiques sur leurs propres données.
2281 J'ai ainsi participé à cette étude pour les données des simulations d'évaluation de CNRM-
2282 AROME et de CNRM-ALADIN et également pour les observations de COMEPHORE sur
2283 la France. Cette étude a donné lieu à une publication dans *Climate Dynamics* dont je suis
2284 la seconde auteure :

2285 Ban, N., Caillaud, C., Coppola, E., Pichelli, E., Sobolowski, S., Adinoli, M., Ahrens,
2286 B., Alias, A., Anders, I., Bastin, S., Belusic, D., Berthou, S., Brisson, E., Cardoso, R.
2287 M., Chan, S. and others (2021) **The first multi-model ensemble of regional climate**
2288 **simulations at kilometer-scale resolution, Part I : Evaluation of precipitation.**
2289 *Clim Dyn* 57, 275-302. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05708-w>

2290 Dans cette étude, un ensemble de 23 simulations d'évaluation de CP-RCMs (dont le
2291 détail est donné dans Ban et al (2021)) est comparé aux observations de précipitation à
2292 haute résolution disponibles et aux RCMs qui les forcent. Deux simulations sont forcées
2293 directement par ERA-Interim, celle de UM-UKMO (le RCM à 12km est donné à titre de
2294 comparaison) et celle de CCLM-JLU.

2295 Les simulations et les observations sont comparées pour les précipitations moyennes,
2296 l'intensité et la fréquence des précipitations, et les fortes précipitations aux pas de temps
2297 quotidiens (percentile 99%) et horaires (percentile 99.9%). L'article s'intéresse seulement
2298 aux saisons hivernale et estivale. La valeur ajoutée des CP-RCMs par rapport aux RCMs
2299 est démontrée pour la représentation des précipitations, plus importante si l'on s'intéresse
2300 aux fortes précipitations et à la fréquence des précipitations aux pas de temps quotidien et
2301 horaire. La valeur ajoutée trouvée est plus marquée pendant la saison estivale.

2302 Comme les calculs avaient été également faits pour l'automne (SON, proche du SOND
2303 qui est utilisé dans mes analyses), Nikolina Ban a tracé les figures identiques à celles de
2304 l'article pour ma saison d'intérêt. La Figure 3.1 compare les extrêmes de précipitation
2305 quotidienne et horaire pour la moyenne des ensembles de CP-RCMs, de RCMs et les obser-
2306 vations. On retrouve, en automne, une représentation plus réaliste des précipitations par
2307 les CP-RCMs que par les RCMs et en particulier pour l'échelle horaire où les RCMs pro-
2308 duisent des intensités beaucoup plus faibles que celles observées. De même, l'ensemble des
2309 CP-RCMs propose un meilleur positionnement des maxima horaires de précipitation avec,
2310 par exemple, l'extension vers les plaines dans les contreforts des Cévennes. Les conclusions
2311 pour la moyenne multi-modèle de ce large ensemble de simulations à convection profonde
2312 résolue sont donc similaires à celles qui ont pu être faites pour la longue simulation d'éva-
2313 luation de CNRM-AROME (Caillaud et al, 2021).

2314 La Figure 3.2 présente les extrêmes horaires pour chaque simulation de l'ensemble des
2315 CP-RCMs et des RCMs associés, ainsi que le positionnement de chaque modèle dans les
2316 panels multi-modèles. Il est ainsi possible de comparer deux à deux chaque couple de CP-
2317 RCM/RCM aux observations. La valeur ajoutée des CP-RCMs par rapport aux RCMs est
2318 retrouvée dans la plupart des couples de modèle pour les extrêmes horaires de l'automne. On
2319 peut remarquer que cette valeur ajoutée dépend fortement du RCM auquel on se compare :
2320 il est ainsi plus facile de montrer une valeur ajoutée avec une mauvaise référence. En effet,
2321 certains RCMs proposent des valeurs particulièrement faibles, ce qui est le cas, par exemple,
2322 des RCMs ALADIN-CNRM, RegCM-ICTP, WRF-IPSL ou WRF-UHOH. A l'opposé, deux
2323 RCMs se distinguent avec des valeurs plus fortes et notamment une forte surestimation des
2324 valeurs observées par le RCM RegCM-DHMZ. Sur les 22 couples, on peut considérer qu'il
2325 n'y a pas de valeur ajoutée pour le couple de REMO-GERICS et que celle-ci est plus
2326 difficile à établir pour les couples UM-UKMO et RegCM-DKRZ.

2327 Si l'on compare maintenant les CP-RCMs entre eux et alors qu'ils sont tous forcés par
2328 la réanalyse ERA-Interim, on peut remarquer une assez grande diversité de comportement
2329 pour représenter les extrêmes horaires de l'automne : si la grande majorité des CP-RCMs
2330 proposent des valeurs proches des observations, quelques modèles se distinguent : REMO-
2331 GERICS et WRF-IPSL sous-estiment assez fortement les extrêmes, tandis que RegCM-
2332 ICTP et surtout RegCM-DHMZ les surestiment. Au sein de la famille WRF, on remarque

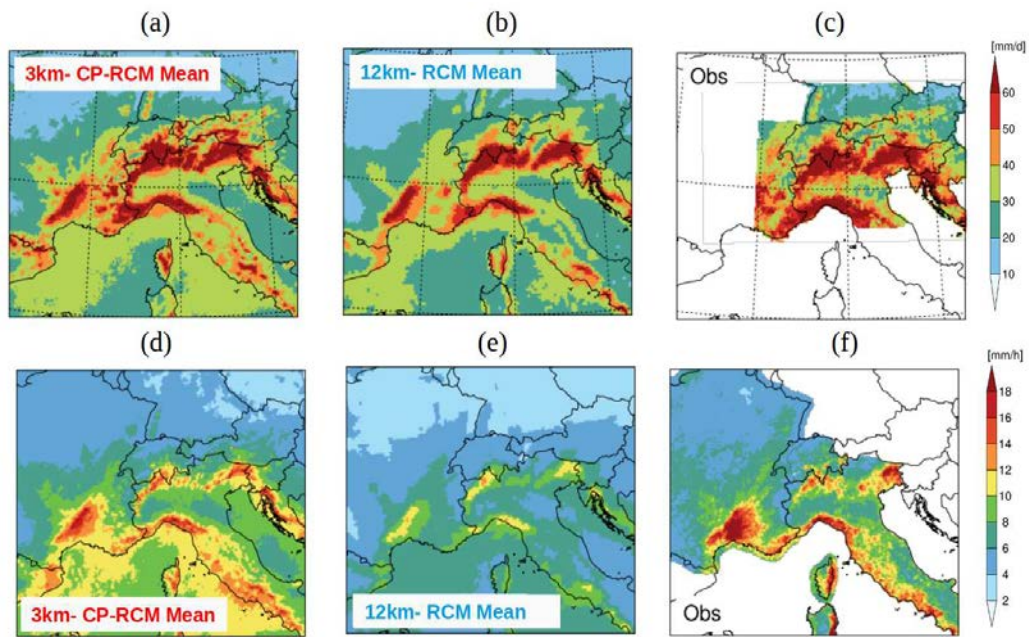


FIGURE 3.1 – Extrêmes quotidiens (a,b,c) et horaires (d,e,f) de précipitation de l’automne SON (percentiles 99% des précipitations quotidiennes et 99.9% des précipitations horaires) pour les simulations d’évaluation de dix ans (2000-2009) pour (a,d) un ensemble de 23 CP-RCMs du FPS Convection (2-3 km), (b,e) un ensemble de 22 RCMs (12-15 km) et (c,f) les observations, d’après Ban et al (2021)

2333 aussi des comportements pouvant être très différents. Ces différences entre simulations
 2334 avaient également été mises en évidence pour la saison estivale dans Ban et al (2021) avec
 2335 notamment un problème pour simuler les précipitations convectives estivales avec WRF-
 2336 IPSL et WRF-BCCR, et des pluies trop fortes avec les deux RegCMs. Pour les simulations
 2337 avec le modèle WRF, les différences pourraient s’expliquer par des choix de physique diffé-
 2338 rents entre les modèles. Par contre, au sein des familles AROME et CCLM, on peut noter
 2339 un comportement similaire des différents CP-RCMs.

2340 Cette intercomparaison a permis de mettre en évidence des problèmes de comportement
 2341 pour quelques modèles. Depuis ce papier, certains groupes ont déjà pu améliorer leur version
 2342 du modèle. Ainsi, l’IPSL a mis en oeuvre une nouvelle version de WRF et dans l’approche
 2343 lagrangienne de la partie suivante, la simulation de WRF-IPSL a été réalisée à partir
 2344 d’une version différente de celle utilisée ici. De même, une nouvelle version de RegCM a été
 2345 développée depuis que ces simulations ont été réalisées (Giorgi et al, 2023) (mais l’ensemble
 2346 des simulations de la thèse se base sur la même version que celle utilisée pour Ban et al
 2347 (2021)).

2348 Ces statistiques eulériennes ont ainsi démontré la bonne performance de la majeure par-
 2349 tie des simulations de CP-RCMs pour simuler les extrêmes de précipitation de l’automne,
 2350 ainsi qu’une valeur ajoutée des CP-RCMs par rapport aux RCMs, en particulier à l’échelle
 2351 horaire.

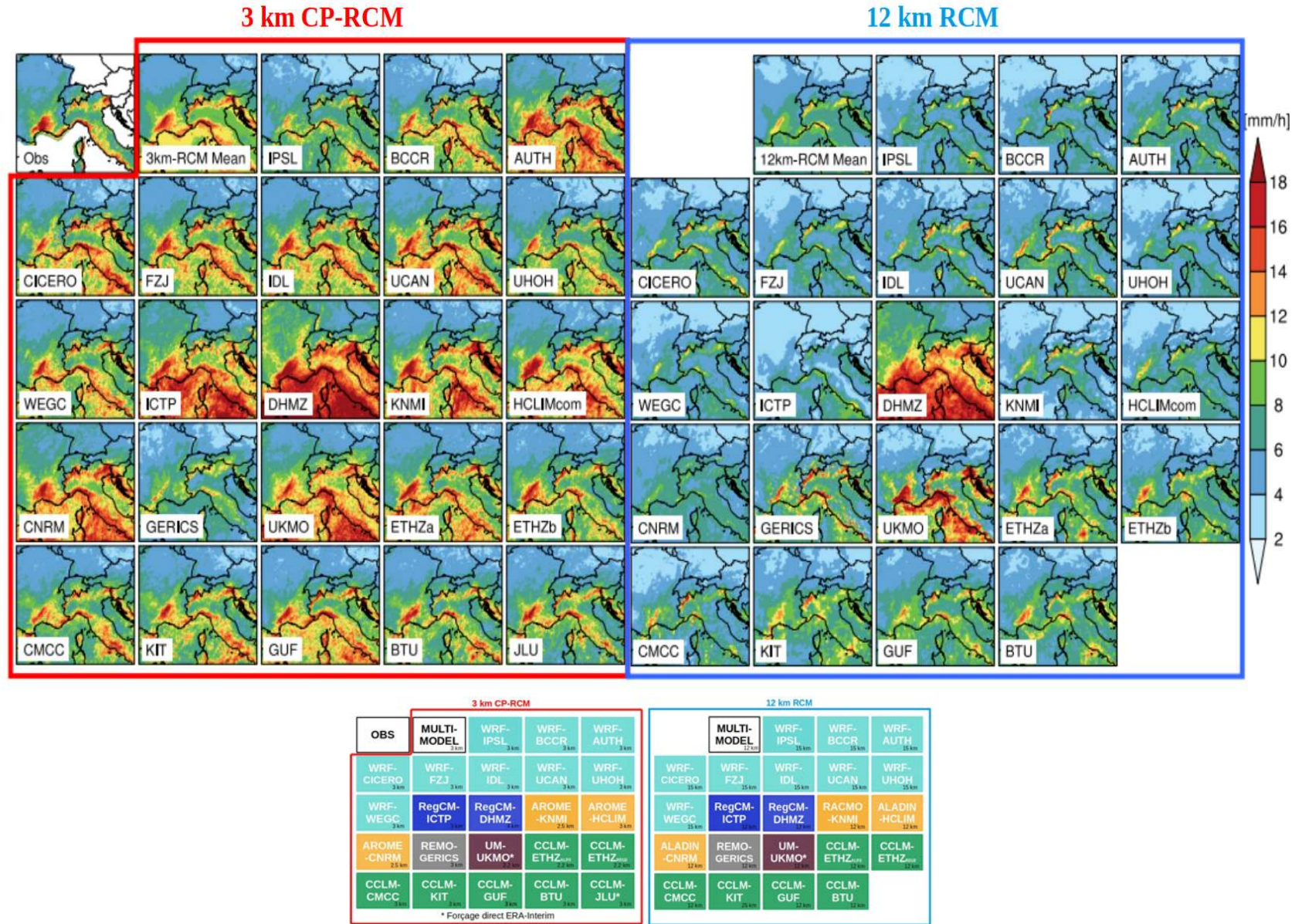


FIGURE 3.2 – Extrêmes horaires de précipitation de l’automne SON (percentiles 99.9% des précipitations horaires) pour les simulations d’évaluation de dix ans (2000-2009, SON) des 23 CP-RCMs du FPS Convection (2-3 km) et des 22 RCMs (12-15 km), comparés aux observations d’après Ban et al (2021)

2352 3.2.2 Approche lagrangienne

2353 L'approche lagrangienne mise en place pour évaluer le CP-RCM CNRM-AROME est
 2354 maintenant appliquée à l'ensemble multi-modèle de simulations d'évaluation du FPS Convec-
 2355 tion, afin de déterminer, de manière plus spécifique et détaillée, l'aptitude des CP-RCMs
 2356 à représenter les épisodes méditerranéens de l'automne. Un sous-ensemble de 14 simula-
 2357 tions a été défini par rapport aux 23 simulations de Ban et al (2021) : ce sont celles pour
 2358 lesquelles les simulations historiques et scénarios sont également disponibles (excepté pour
 2359 GUF-CCLM). La liste des simulations de dix ans utilisées en entrée de l'outil de détection
 2360 et de suivi des systèmes précipitants OSIRIS a été donnée au chapitre 2 dans la Table 2.6
 2361 et leur positionnement dans les figures de panel multi-modèle est indiqué dans la Figure
 2362 3.3.

2363 Les données d'observation de référence sont une combinaison des données COME-
 2364 PHORE sur la France et GRIPHO sur l'Italie, pour la période de dix ans de 2001 à
 2365 2010 (période de dix ans où les deux jeux d'observation sont disponibles et la plus proche
 2366 de la période d'évaluation) pour les cartes de distribution spatiale sur le domaine pan-
 2367 alpin et pour la période 2000-2009 pour les analyses sur le domaine French MED où seul
 2368 COMEPHORE est utilisé.

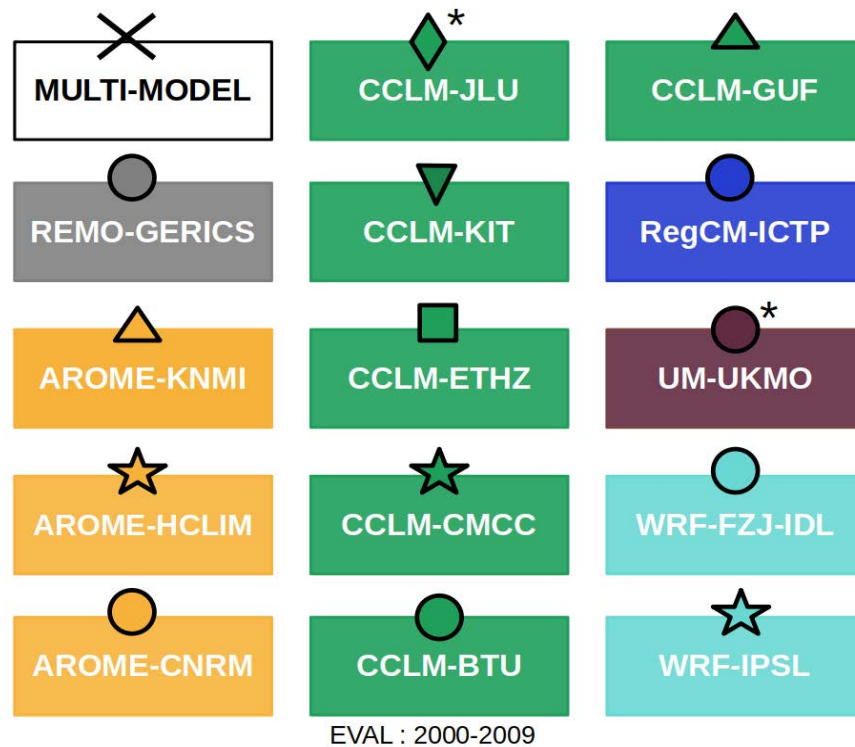


FIGURE 3.3 – Positionnement des différentes simulations dans les figures multi-modèles en fonction des familles de CP-RCM (une couleur par famille de CP-RCM) avec des symboles différents par institut au sein d'une même famille.

* CCLM-JLU et UM-UKMO : forçage direct à partir de la réanalyse ERA-Interim

Pour UM-UKMO : domaine pan-européen REU-2

Pour CCLM-GUF : domaine méditerranéen MED-3

2369 **3.2.2.1 Distribution spatiale des épisodes méditerranéens sur le domaine pan-**
2370 **alpin**

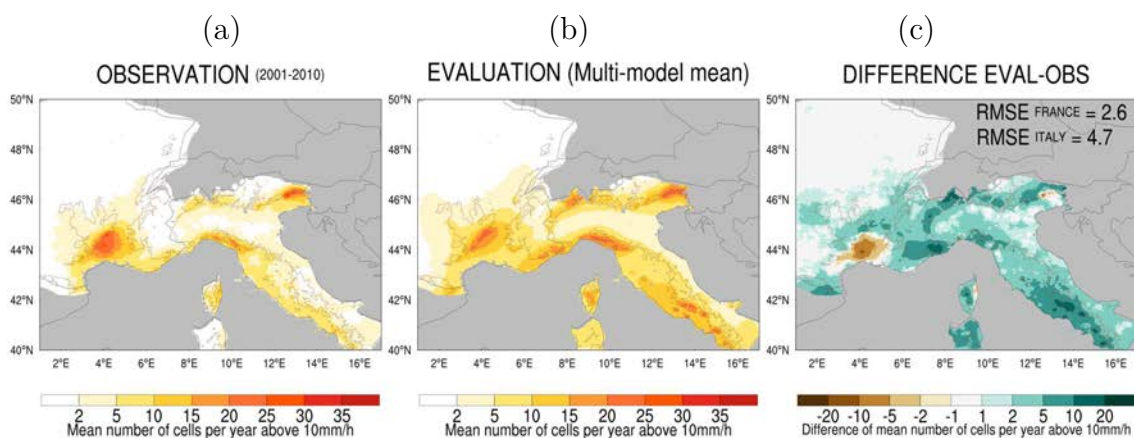


FIGURE 3.4 – Distribution spatiale du nombre moyen par an de cellules supérieures à 10 mm/h pendant l’automne (SOND) pour (a) les observations (2001-2010), (b) la moyenne multi-modèle des simulations d’évaluation (2000-2009) et (c) les différences brutes entre la moyenne multi-modèle et les observations avec les RMSEs indiquées pour les sous-domaines France et Italie. Sur toutes les figures, l’orographie (750 m) est représentée par des lignes marrons

2371 Nous nous intéressons ici aux distributions spatiales des systèmes précipitants de l’au-
2372 tomne pour le seuil 10 mm/h que nous avons choisi dans l’article d’évaluation de CNRM-
2373 AROME en raison de sa bonne représentativité des zones connues pour être affectées par les
2374 épisodes méditerranéens. En comparant les distributions observées et celles de la moyenne
2375 de l’ensemble des simulations d’évaluation sur le domaine pan-alpin (cf. Figures 3.4 a et
2376 b), nous pouvons tout d’abord indiquer que la moyenne multi-modèle se comporte bien
2377 en termes de nombre et par le positionnement géographique des zones affectées par les
2378 épisodes méditerranéens d’automne qui sont : le sud-est de la France, en particulier les
2379 contreforts des Cévennes, la Côte d’Azur et la partie orientale de la Corse, la côte occi-
2380 dentale italienne avec en particulier la Ligurie, les contreforts des Alpes italiennes et en
2381 particulier les Alpes Carniques. Si l’on s’intéresse à chaque simulation individuellement (cf.
2382 Figure 3.5), une conclusion similaire peut être tirée, même si l’on observe des différences
2383 de densité entre les simulations, avec, par exemple, des valeurs beaucoup plus faibles pour
2384 REMO-GERICS ou beaucoup plus fortes pour RegCM-ICTP et surtout WRF-IPSL. On
2385 peut également noter des comportements assez différents sur mer, avec les simulations
2386 les plus actives sur mer qui sont également celles qui le sont sur terre, mais en l’absence
2387 d’observation, il n’est pas possible de les évaluer sur cette zone. Les différences absolues
2388 (cf. Figures 3.4 c et 3.6) et les valeurs des erreurs quadratiques moyennes (Root Mean
2389 Square Errors ou RMSEs) pour les sous-domaines France et Italie indiquent une tendance
2390 générale à surestimer le nombre d’événements par rapport aux observations, excepté dans
2391 les contreforts des Cévennes. Cette surestimation est particulièrement visible sur le relief,
2392 mais la sous-estimation connue des précipitations observées dans ces zones (Neff, 1977;
2393 Yang et al, 1999) ne permet pas de caractériser correctement un éventuel problème des

2394 CP-RCMs. La surestimation se retrouve plus généralement aussi sur Italie, où les valeurs
2395 de RMSEs sont plus élevées que sur la France, mais la fiabilité des données peut également
2396 être remise en question, car GRIPHO, uniquement basé sur les données de stations, n'utilise
2397 pas de données radar pour améliorer la couverture des précipitations. Cependant, au
2398 niveau des contreforts des Cévennes et jusqu'en plaine, zone où l'on peut avoir confiance
2399 dans les données observées de COMEPHORE, la moyenne multi-modèle, ainsi que la plu-
2400 part des simulations (dans une moindre mesure pour les simulations d'AROME et celle de
2401 CCLM-ETHZ), proposent des valeurs de densité nettement plus faibles que dans les obser-
2402 vations. Cette sous-estimation met en évidence de possibles faiblesses dans les CP-RCMs
2403 pour simuler correctement certains processus convectifs de méso-échelle qui ont lieu sur les
2404 contreforts ou en plaine, tels que les dômes froids comme le suggèrent Hirt et al (2020).
2405 En classant les simulations par type de CP-RCM, il est possible de trouver des similitudes
2406 de comportement pour les simulations de la famille AROME qui, par exemple, présentent
2407 toutes un biais moins marqué dans les contreforts des Cévennes, ou pour les simulations
2408 de la famille CCLM avec des distributions assez semblables, proches des observations et
2409 avec des RMSEs généralement plus faibles que ceux des autres simulations. Par contre, les
2410 deux simulations de WRF ont des comportements assez différents avec des biais beaucoup
2411 plus forts pour la simulation de WRF-IPSL, ce qui pourrait s'expliquer par des choix de
2412 paramétrisations différents entre les deux versions utilisées ou encore par des différences
2413 venant du RCM intermédiaire. Si l'on s'intéresse aux simulations forcées directement par
2414 ERA-Interim, CCLM-JLU est la simulation qui a les valeurs de RMSE les plus faibles.
2415 UM-UKMO ne se distingue pas particulièrement des autres simulations, mais cela peut
2416 s'expliquer par la grande taille du domaine pan-européen sur lequel les simulations sont
2417 réalisées.

2418 3.2.2.2 Focus sur les épisodes méditerranéens français

2419 Nous nous intéressons maintenant aux épisodes méditerranéens français (tels que définis en 2.5.7) et à leurs caractéristiques, dans une zone French MED où la fiabilité des
2420 observations permet une évaluation correcte des simulations. La Figure 3.7 (a) résume les
2421 différences par rapport aux observations, pour la moyenne multi-modèle et pour chaque
2422 simulation, pour les principales caractéristiques des systèmes précipitants moyennées sur la
2423 zone. Les biais significatifs au niveau de confiance de 90 % grâce à une méthode de boot-
2424 trap décrite en 2.6.2 sont également indiqués. Nous remarquons tout d'abord un nombre
2425 assez similaire de trajectoires entre la moyenne multi-modèle et les observations ("Num-
2426 ber", respectivement 235/an et 201/an). Toutefois, deux simulations, que nous avons déjà
2427 mises en évidence pour les distributions spatiales sur l'ensemble du domaine pan-alpin, se
2428 distinguent : REMO-GERICS avec une sous-estimation du nombre de systèmes (-79%) et
2429 WRF-IPSL qui surestime largement leur nombre (+144%). L'information sur le nombre de
2430 jours dépassant 100 mm/j ("Nb100") est également ajoutée et peut être considérée comme
2431 un proxy du nombre de jours avec des conditions synoptiques favorables pour les épisodes
2432 méditerranéens. Les valeurs sont proches de l'observation pour la moyenne de l'ensemble et
2433 pour la majorité des simulations, mais on retrouve les différences les plus grandes pour les
2434 simulations dont les différences du nombre de trajectoires sont aussi plus importantes. On
2435

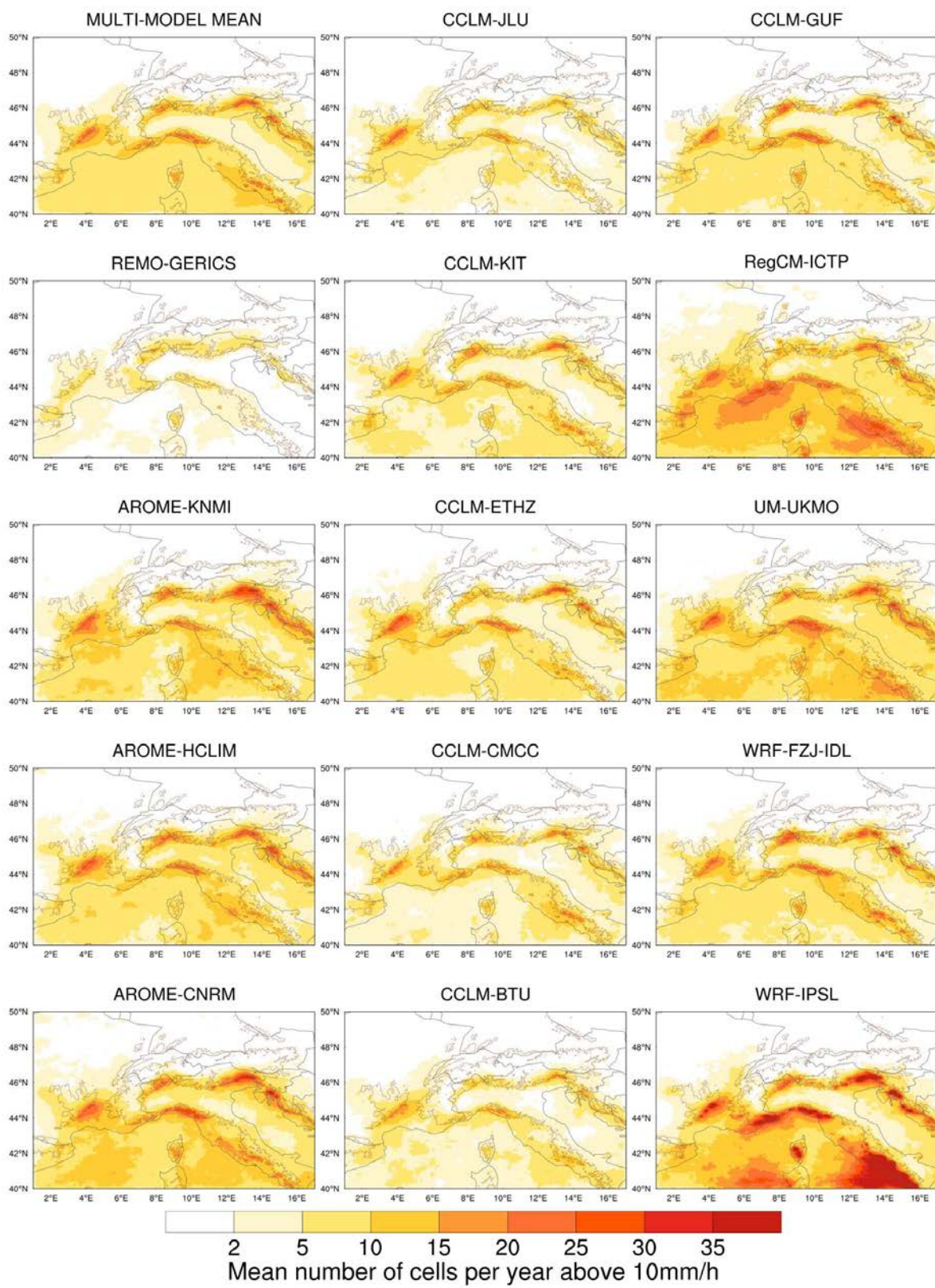


FIGURE 3.5 – Distribution spatiale du nombre moyen par an de cellules supérieures à 10 mm/h pendant l'automne (SOND) pour les simulations d'évaluation (2000-2009) pour la moyenne multi-modèle et les 14 CP-RCMs. Sur toutes les figures, l'orographie (750 m) est représentée par des lignes marrons

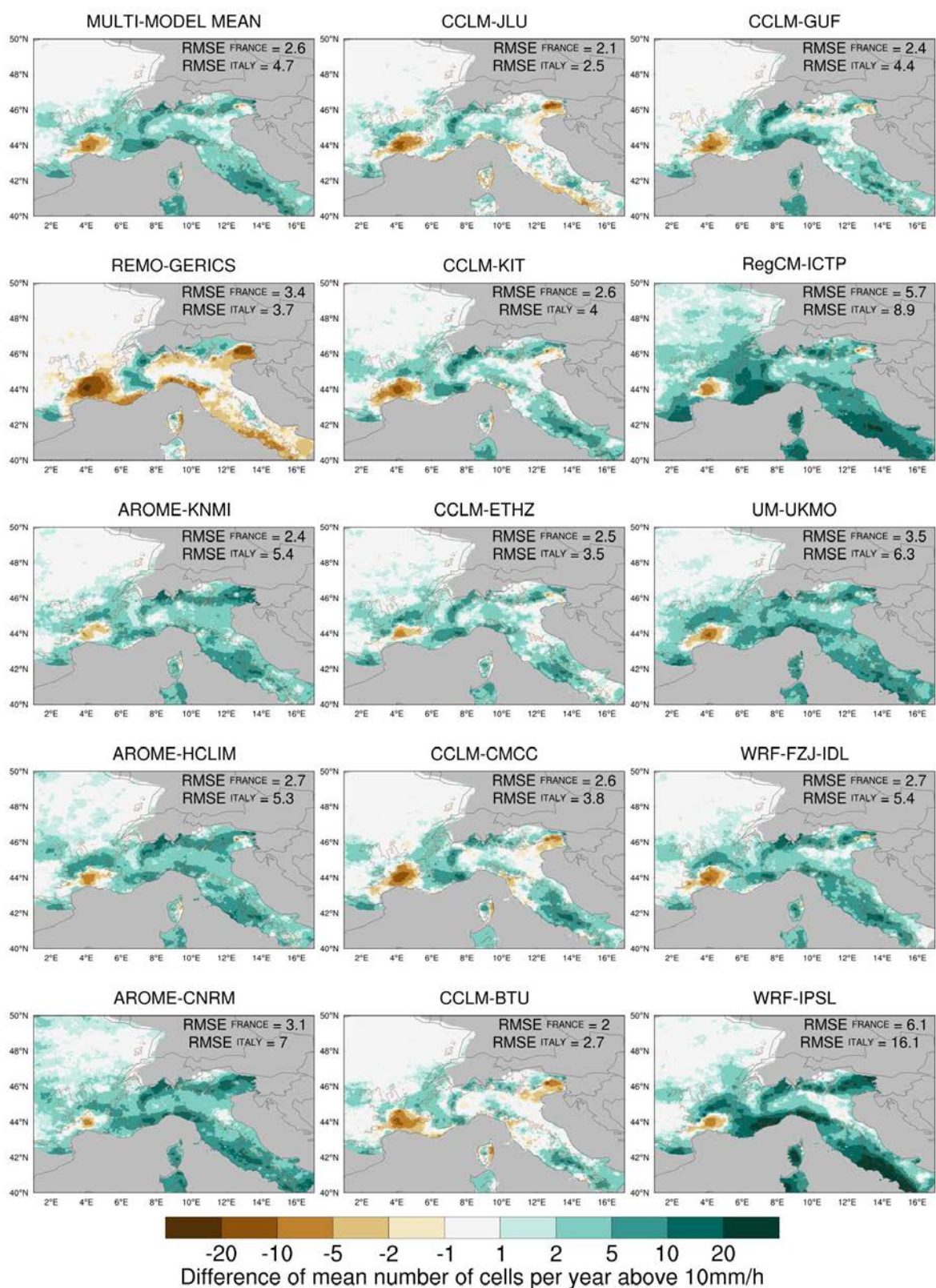


FIGURE 3.6 – Différences brutes des nombres moyens par an de cellules supérieures à 10 mm/h pendant l'automne (SOND) entre les simulations d'évaluation (2000-2009) et les observations (2001-2010) pour la moyenne multi-modèle et les 14 CP-RCMs. Les RMSEs sont indiquées pour les sous-domaines France et Italie, pour chaque simulation. Sur toutes les figures, l'orographie (750 m) est représentée par des lignes marrons

2436 peut noter que la simulation de CNRM-AROME pour laquelle le RCM utilise du pilotage
2437 spectral et la simulation de CCLM-JLU forcée directement par ERA-Interim sont parmi
2438 celles dont le nombre de jours dépassant 100 mm/j, ainsi que le nombre de trajectoires sont
2439 très proches des observations. Pour les autres caractéristiques, on remarque tout d'abord
2440 que les différences avec les observations sont assez faibles, bien que parfois significatives,
2441 pour la plupart des propriétés des systèmes précipitants et pour la plupart des simulations.
2442 Toutefois, des biais peuvent être mis en évidence. Concernant les durées, une surestimation
2443 significative est constatée pour la plupart des simulations, avec une valeur de +12% pour
2444 la moyenne multi-modèle. Concernant les intensités, les différences sont faibles, mais on
2445 remarque, en particulier, une surestimation de +13% des intensités maximales par RegCM
2446 et une tendance à la sous-estimation pour la plupart des autres simulations. Alors qu'elles
2447 sont plutôt correctement simulées par les autres simulations, les surfaces moyennes et maxi-
2448 males sont surestimées de manière significative par les simulations AROME et RegCM, et
2449 surtout REMO. En conséquence, il y a également une plus grande différence de volume
2450 pour ces simulations (jusqu'à +246% pour REMO-GERICS). Concernant les vitesses de
2451 propagation des systèmes, toutes les simulations les surestiment de manière significative
2452 (+29% pour la moyenne de l'ensemble). Cette surestimation pourrait expliquer des biais
2453 plus faibles, voire même négatifs pour quelques simulations, des sévérités par rapport aux
2454 biais de volume, car on rappelle que l'indice de sévérité est inversement proportionnel à la
2455 vitesse de déplacement des vitesses. Pour REMO et RegCM, la surestimation des sévéri-
2456 tés reste toutefois marquée. Pour les simulations de la famille CCLM, les comportements
2457 sont assez proches avec des biais généralement faibles, bien que significatifs pour certains.
2458 Les simulations WRF et UM présentent également des biais relativement faibles pour la
2459 plupart des caractéristiques (si l'on excepte le nombre de systèmes pour WRF-IPSL, et
2460 dans une moindre mesure pour UM-UKMO). Il n'est pas noté, pour les systèmes convectifs
2461 de l'automne, de performance moins bonne des modèles n'ayant pas activé de schéma de
2462 convection peu profonde (UM-UKMO, CCLM-ETHZ).

2463 Les conclusions concernant CNRM-AROME sont conformes à celles trouvées dans
2464 Caillaud et al (2021) avec un bon comportement du modèle malgré une surestimation des
2465 surfaces et une sous-estimation des intensités maximales. La très bonne représentation des
2466 sévérités pourrait toutefois s'expliquer par une compensation entre la surestimation des
2467 surfaces et de la vitesse et la sous-estimation des intensités.

2468 Afin de combiner certaines caractéristiques des systèmes précipitants, nous présentons
2469 les graphes d'IDF (maximum Intensity Duration Frequency, cf. Figures 3.7 b, c, d) et
2470 d'IAF (maximum Intensity maximum Area Frequency, cf. Figures 3.7 e, f, g), définis dans
2471 la Section 2.5.5.

2472 Les patterns pour la moyenne multi-modèle (c,f) et pour les observations (b,e) sont si-
2473 milaires, à la fois pour les graphes d'IDF et d'IAF. Les différences absolues (d,g) confirment
2474 toutefois une tendance à surestimer les durées de vie et les surfaces, quelle que soit l'inten-
2475 sité, pour la moyenne de l'ensemble des simulations. Si l'on compare les graphes individuels
2476 d'IDF et d'IAF pour chaque simulation et en particulier les différences absolues avec les
2477 observations (cf. Figures 3.8 et 3.9 pour les IDF, 3.10 et 3.11 pour les IAFs), on peut
2478 constater des similitudes de comportement par famille de CP-RCM. En particulier, les

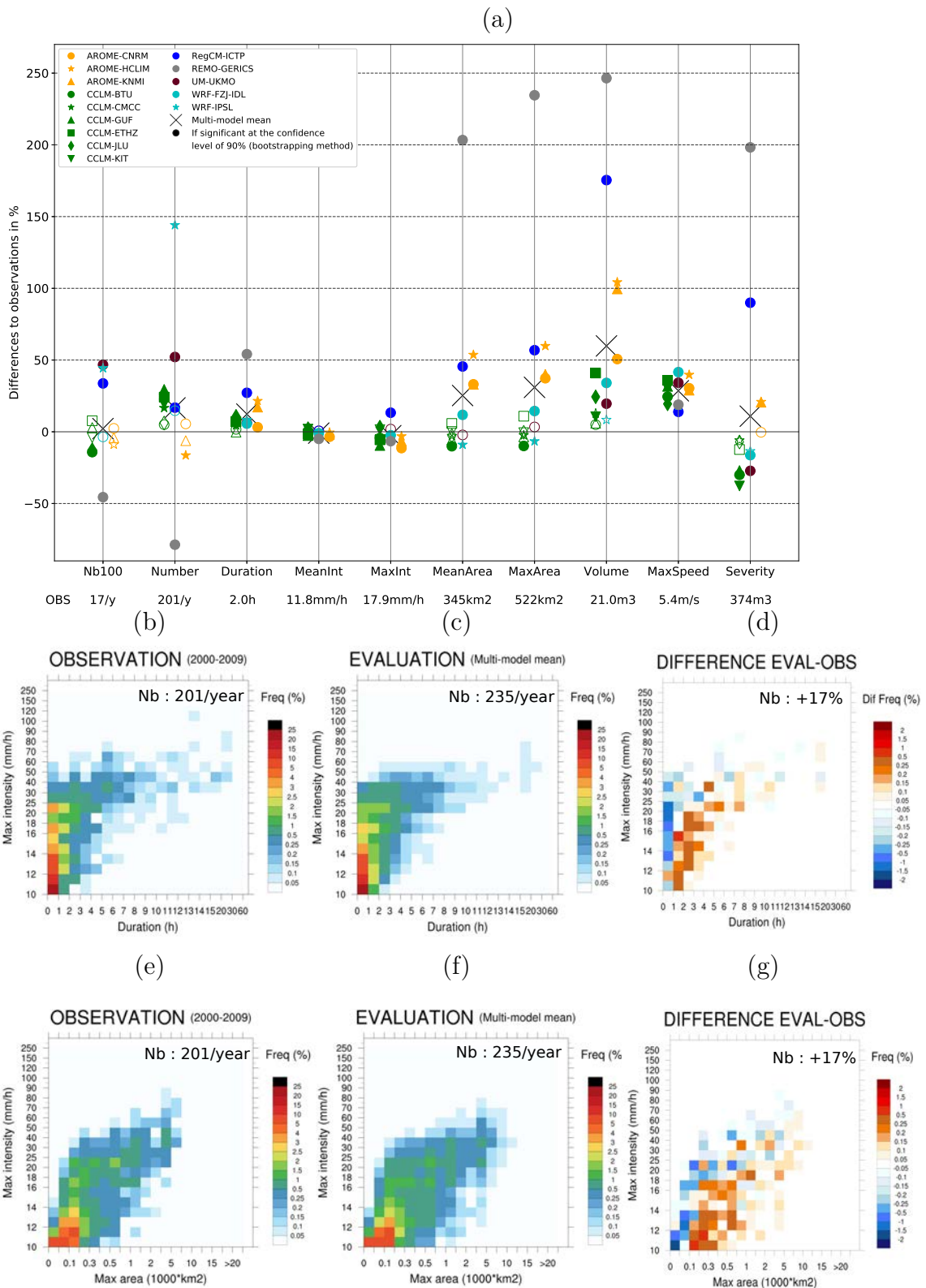


FIGURE 3.7 – (a) Différences relatives des caractéristiques (en %) entre les simulations d'évaluation et les observations pour la moyenne multi-modèle et les 14 CP-RCMs (une couleur par famille de CP-RCM et un symbole par CP-RCM). Graphes d'IDF (b,c,d) et d'IAF (e,f,g) pour les observations (b,e), la moyenne multi-modèle des simulations d'évaluation (c,f) et leurs différences (d,g). Nous considérons toutes les trajectoires de cellules supérieures à 10 mm/h lors de journées dépassant 100 mm/j dans la zone French MED pendant l'automne (SOND) et pour la période 2000-2009

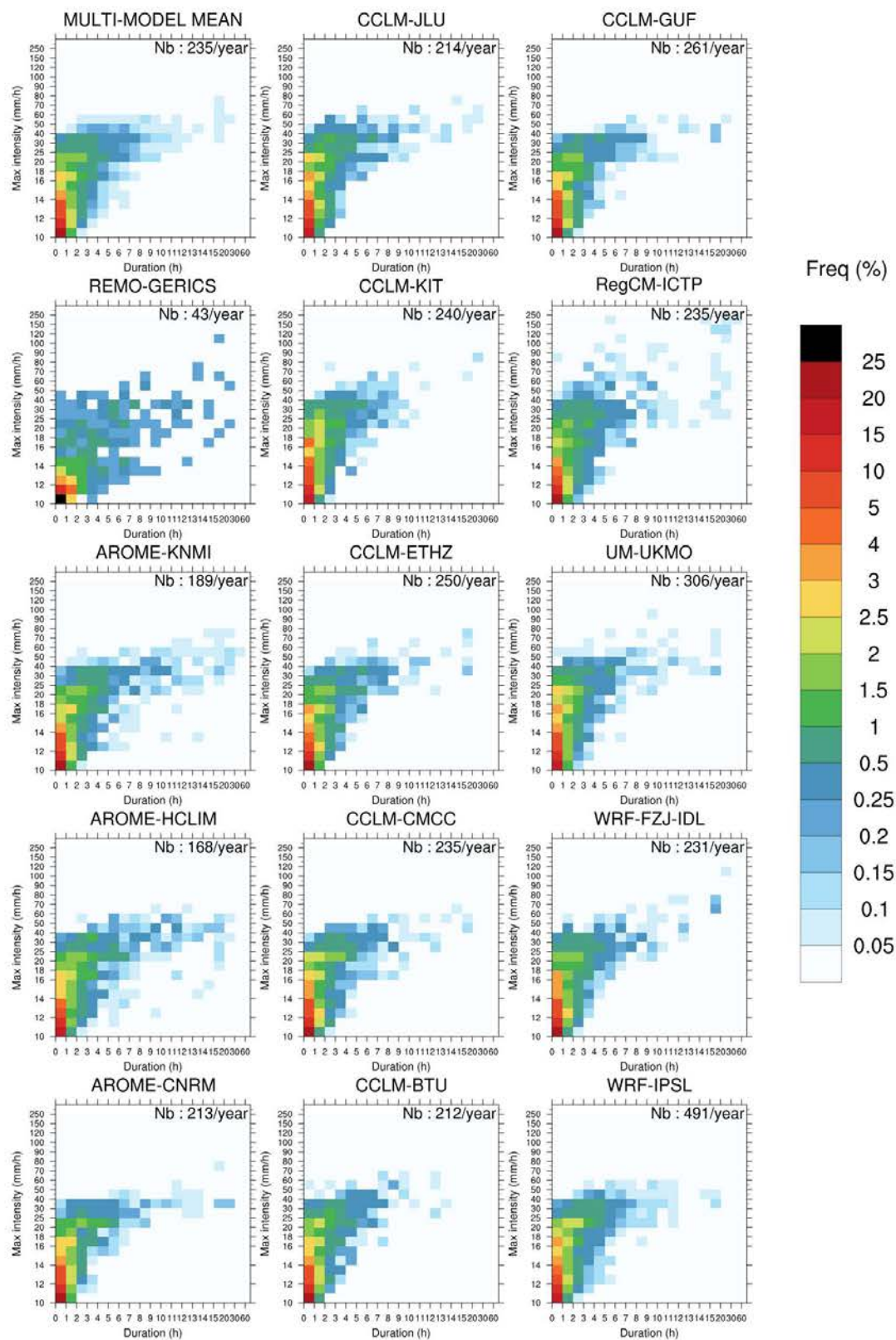


FIGURE 3.8 – Graphes d>IDF pour la moyenne multi-modèle et les 14 CP-RCMs (le nombre moyen de trajectoires par an est donné pour chaque simulation). Nous considérons toutes les trajectoires de cellules supérieures à 10 mm/h lors de journées dépassant 100 mm/j dans la zone French MED pendant l'automne (SOND) et pour la période 2000-2009

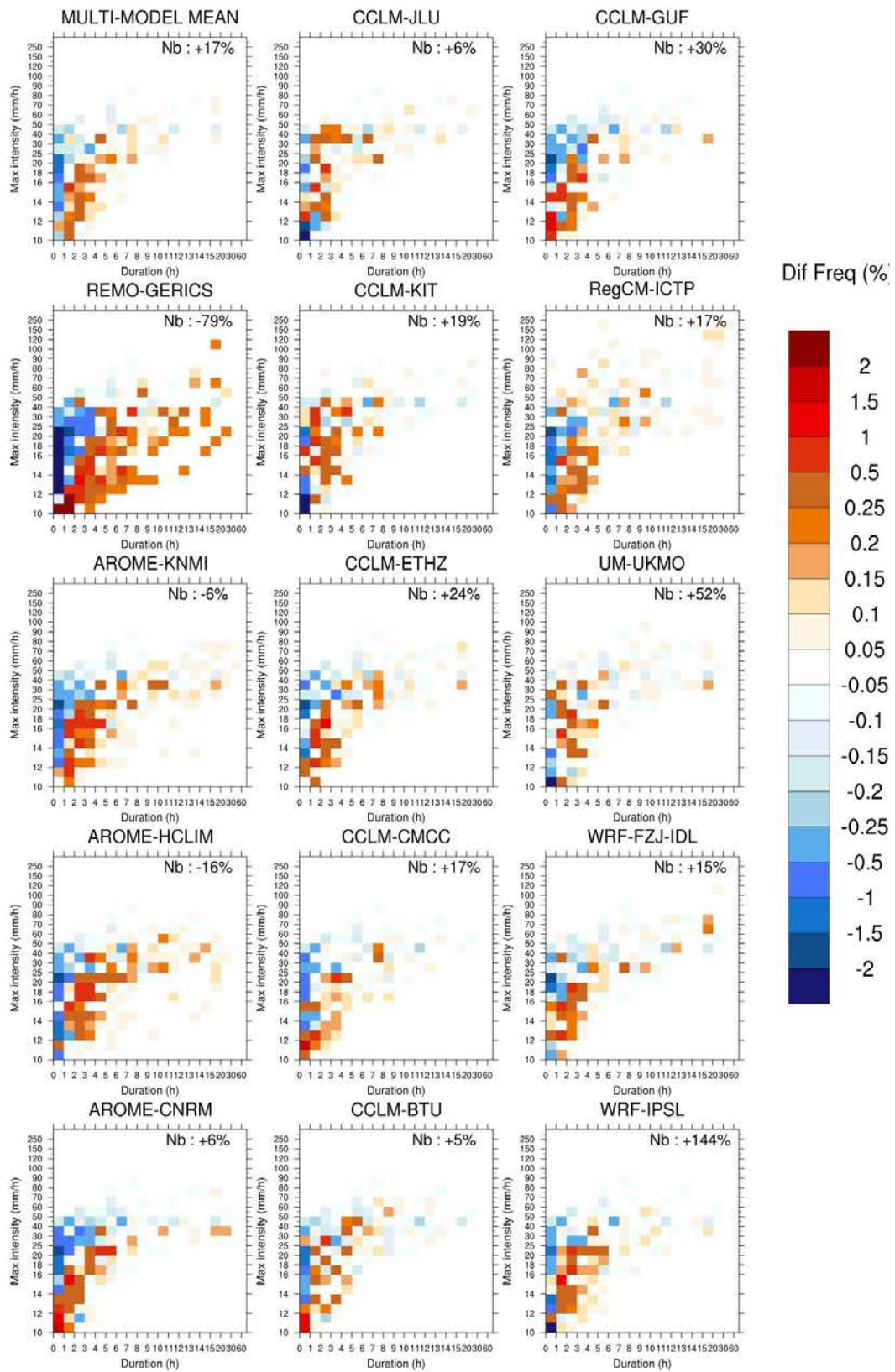


FIGURE 3.9 – Différences d’IDF pour la moyenne multi-modèle et les 14 CP-RCMs (la différence de nombre moyen de trajectoires par an est donnée pour chaque simulation). Nous considérons toutes les trajectoires de cellules supérieures à 10 mm/h lors de journées dépassant 100 mm/j dans la zone French MED pendant l’automne (SOND) et pour la période 2000-2009

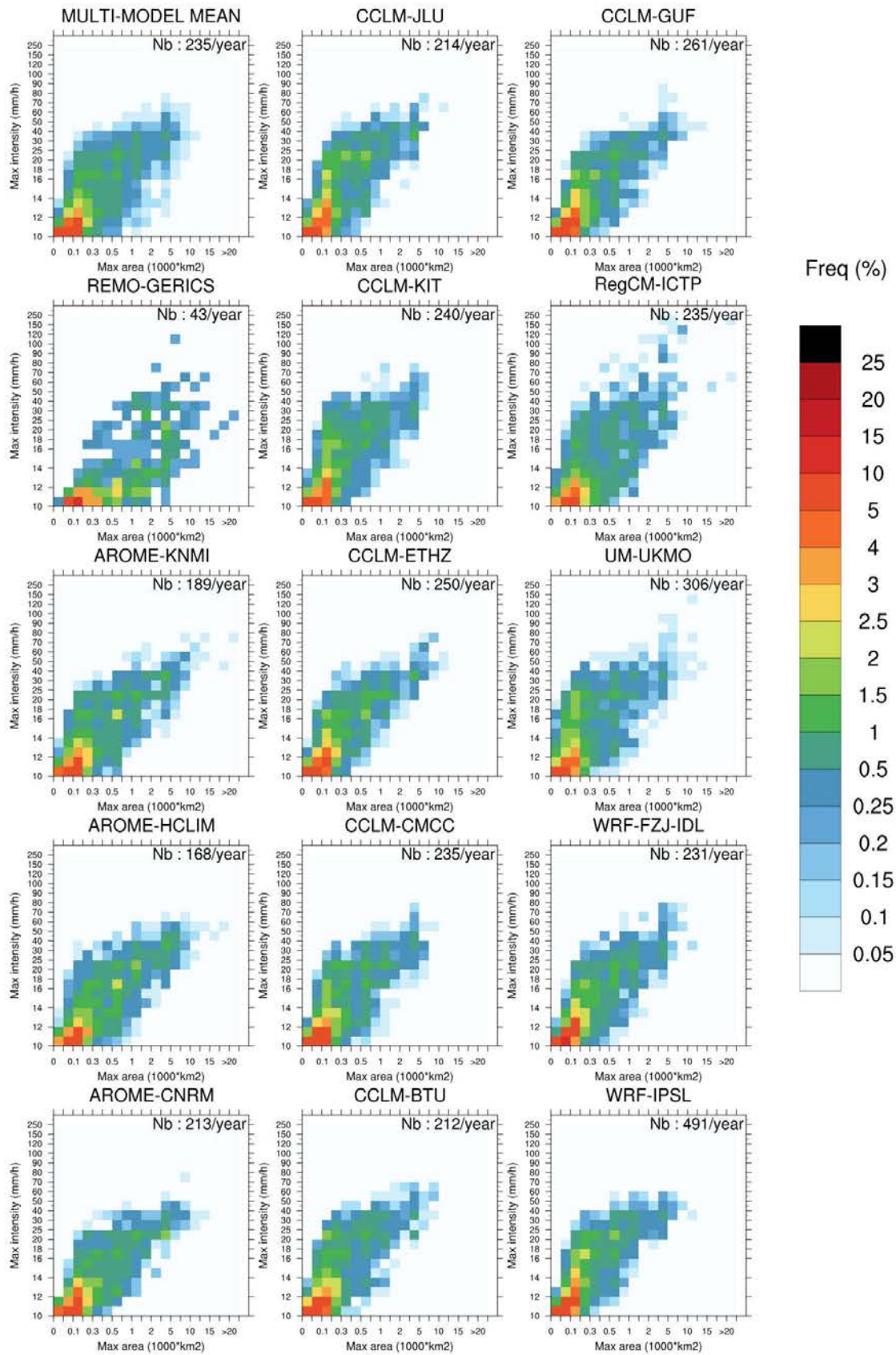


FIGURE 3.10 – Identique à la Figure 3.8, mais pour les graphes d'IAF

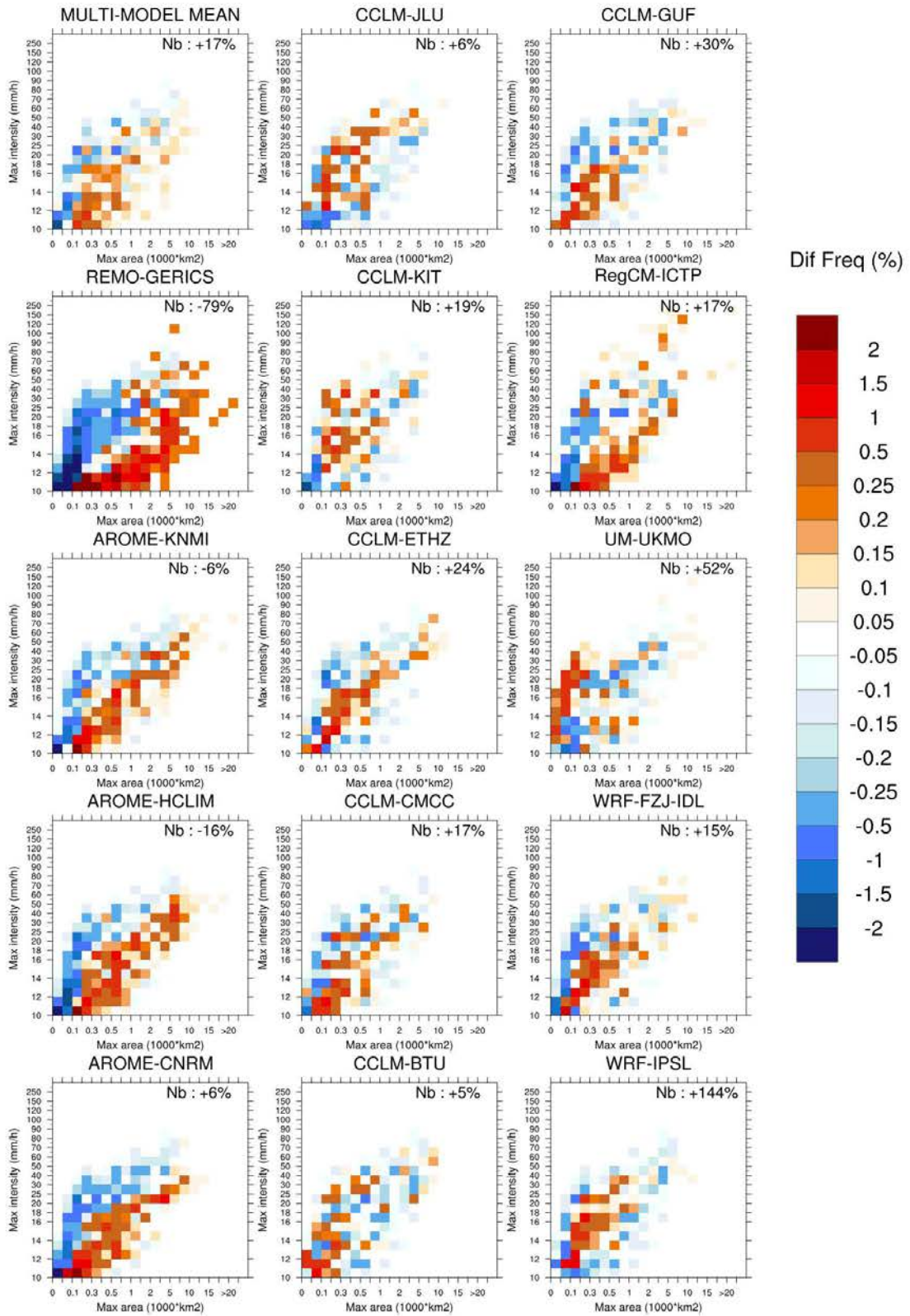


FIGURE 3.11 – Identique à la Figure 3.9, mais pour les graphes d'IAF

2479 trois AROME présentent des patterns proches avec une surestimation nette des durées de
2480 vie et également de leur surface. L'ensemble des graphes de la famille CCLM ont également
2481 des patterns proches avec des biais moins marqués pour les durées et une surestimation
2482 moins systématique des surfaces. Les graphes pour les simulations avec WRF sont éga-
2483 lement peu différents. La simulation du RegCM-ICTP est celle qui propose les intensités
2484 maximales les plus élevées, supérieures aux valeurs observées. REMO-GERICS présente la
2485 plus grande divergence par rapport aux observations, que ce soit pour la surestimation des
2486 durées de vie et surtout des surfaces, associée à une forte sous-estimation du nombre de
2487 trajectoires.

2488 Nous nous intéressons maintenant aux trajectoires les plus intenses, c'est-à-dire celles
2489 dont les intensités maximales sont supérieures au percentile 97% des intensités maximales
2490 de chaque simulation (cf. Figure 3.12). La significativité des résultats n'a pas été testée
2491 ici. Toutes les simulations, excepté celle de REMO-GERICS, surestiment le nombre de
2492 systèmes précipitants, et toujours de manière plus marqué pour WRF-IPSL. La moyenne
2493 multi-modèle présente encore une surestimation des durées (+17%), mais surtout une sur-
2494 estimation plus marquée et plus générale des surfaces, et donc des volumes (+110%). Les vi-
2495 tesses de propagation sont également surestimées, ce qui pourrait expliquer les biais faibles
2496 de sévérité. Si l'on examine le comportement de chaque modèle pour les trajectoires les
2497 plus intenses, certains commentaires faits pour l'ensemble des trajectoires restent valables
2498 et sont souvent amplifiés : une forte surestimation des surfaces avec RegCM et AROME
2499 souvent associée à une surestimation des durées (sauf avec CNRM-AROME) conduit à
2500 une forte surestimation des volumes. En ce qui concerne les intensités, tandis qu'AROME-
2501 CNRM sous-estime les intensités maximales d'environ -28%, RegCM propose la plus grande
2502 surestimation (+85%), ce qui, associé aux biais déjà cités, entraîne une surestimation des
2503 volumes de pluie de plus de 290%. Les simulations qui montraient des biais faibles lorsque
2504 l'on s'intéressait à toutes les trajectoires présentent toutes des surestimations notables de
2505 surface et de volume quand on s'intéresse ici aux systèmes les plus intenses.

2506 Certains biais sont des biais déjà connus des CPMs. Ainsi, les surestimations des du-
2507 rées et des surfaces avaient également été mises en évidence dans Brousseau et al (2016)
2508 pour le modèle AROME en PNT. Dans cette étude, il est également indiqué que ces biais
2509 sont réduits lorsque la résolution du modèle augmente et passe de 2.5 à 1.3 km. On peut,
2510 en effet, noter dans notre comparaison que le biais est plus marqué pour la simulation
2511 AROME-HCLIM qui a une résolution de 3 km que pour les deux autres simulations de
2512 résolution de 2.5 km. Cette tendance à produire des cellules trop grosses peut également
2513 faire appel à la notion de résolution effective qui est plus grande que la résolution nominale
2514 pour le modèle AROME (Ricard et al, 2013) et peut-être également pour d'autres mo-
2515 dèles. On retrouve également une sous-estimation connue des intensités maximales pour
2516 les simulations AROME (Caillaud et al, 2021; Brousseau et al, 2016) par opposition à la
2517 surestimation connue pour RegCM (Stocchi et al, 2022).

2518 Dans cette étude, il faut toutefois noter une différence dans la sélection des trajec-
2519 toires entre simulations et observation. En effet, pour les simulations des modèles, toutes
2520 les trajectoires traversant la zone French MED sont sélectionnées : certaines d'entre elles
2521 peuvent donc inclure une partie en dehors de la zone, alors que ce n'est pas le cas pour les

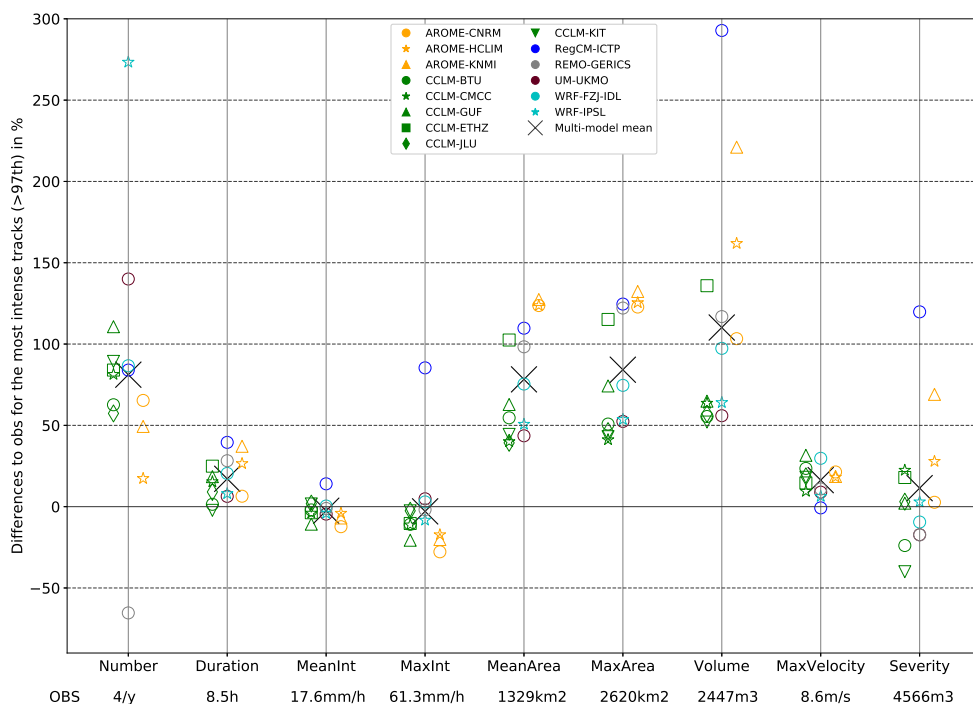


FIGURE 3.12 – Différences relatives des caractéristiques (en %) entre les simulations d'évaluation et les observations pour la moyenne multi-modèle et les 14 CP-RCMs (une couleur par famille de CP-RCM et un symbole par CP-RCM) pour les trajectoires les plus intenses. Nous considérons ici toutes les trajectoires de cellules supérieures à 10 mm/h lors de journées dépassant 100 mm/j dans la zone French MED pendant l'automne (SOND) et pour la période 2000-2009 et dont l'intensité maximale dépasse le percentile 97 % des intensités maximales calculé pour chaque simulation

2522 observations qui ne sont disponibles que sur terre. Une étude comparative a été réalisée
 2523 avec la simulation de 20 ans du modèle CNRM-AROME : d'une part, le tracking a été
 2524 réalisé sur toute la zone ALP-3i et les trajectoires sélectionnées sont celles traversant la
 2525 zone et d'autre part, le tracking a été limité à la zone couverte par les observations. Les
 2526 comparaisons des deux ensembles de trajectoires indiquent des résultats peu différents et
 2527 des conclusions similaires sur les biais du modèle.

2528 3.2.2.3 Bilan de l'approche lagrangienne

2529 Les principaux résultats de cette étude d'évaluation en mode multi-modèle et avec une
 2530 approche objet sont les suivants :

- 2531 • une bonne représentation spatiale des zones connues pour être affectées par les épi-
 2532 sodes méditerranéens, même s'il existe des différences entre les simulations, avec
 2533 notamment une surestimation du nombre de systèmes par WRF-IPSL ou une sous-
 2534 estimation par REMO-GERICS ;
- 2535 • une surestimation apparente du nombre de systèmes précipitants sur les régions mon-
 2536 tagneuses et l'Italie, qu'il est difficile de quantifier compte-tenu de la sous-estimation
 2537 connue des précipitations observées en altitude et de l'absence de données radar dans

- 2538 le jeu de données sur l'Italie ;
- 2539 • une sous-estimation du nombre de systèmes précipitants dans les contreforts des Cé-
2540 vennes jusqu'en plaine par rapport aux observations, dans une moindre mesure avec
2541 les simulations AROME et CCLM-ETHZ. Cette sous-estimation pourrait être liée à
2542 des difficultés pour certains CP-RCMs à représenter certains processus convectifs de
2543 méso-échelle, tels que les dômes froids (Hirt et al, 2020) ;
 - 2544 • dans la zone méditerranéenne française, une représentation correcte des principales
2545 caractéristiques des systèmes fortement précipitants de l'automne par la majorité des
2546 simulations en termes de durée, d'intensité, de surface, de volume, de vitesse de pro-
2547 pagation et de sévérité. Toutefois, des biais sont mis en évidence. Les durées et les
2548 vitesses de propagation sont surestimées par la quasi-totalité des simulations. Pour
2549 les simulations AROME et RegCM, et plus encore pour REMO, on constate une sur-
2550 estimation significative des volumes, liée à des systèmes qui durent trop longtemps et
2551 qui ont des surfaces trop grandes. Ces biais entraînent aussi une surestimation impor-
2552 tante des sévérités pour RegCM et REMO. RegCM simule également des intensités
2553 maximales trop élevées, alors qu'AROME-CNRM les sous-estime. La plupart de ces
2554 biais sont plus marqués quand on s'intéresse aux systèmes les plus intenses.
 - 2555 • malgré quelques biais indiqués ci-dessus, AROME-CNRM se place parmi les modèles
2556 ayant un bon comportement pour reproduire les caractéristiques des systèmes pré-
2557 cipitants de l'automne avec, en particulier, une sous-estimation moins marquée du
2558 nombre de systèmes au piémont des Cévennes.

2559 **3.3 Evaluation multi-tracker de l'ensemble du FPS** 2560 **Convection pour la simulation des événements pré-** 2561 **cipitants sur le domaine pan-alpin**

2562 **3.3.1 Référence de l'article publié dans Climate Dynamics**

2563 Müller, S.K., Caillaud, C., Chan, S., de Vries, H., Bastin, S., Berthou, S., Brienens, S.,
2564 Brisson, E., Demory, M.E., Dobler, A., Feldmann, H., Gørgen, K., Katragkou, E., Keu-
2565 ler, K., Pichelli, E., Raffa, M., Tölle, M. and Warrach-Sagi, K. (2023), **Evaluation of**
2566 **Alpine-Mediterranean Precipitation Events in convection-permitting Regional**
2567 **Climate Models using a Set of Tracking Algorithms**. *Clim Dyn* 61(1-2), 939-957.
2568 <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06555-z>

2569 **3.3.2 Résumé de l'article**

2570 Cette étude a été réalisée en étroite collaboration avec trois autres chercheurs du FPS
2571 Convection qui utilisent également des outils de détection et de suivi des systèmes précipi-
2572 tants (Sebastian Müller de l'ICTP, Hylke de Vries du KNMI et Steven Chan de l'université
2573 de Newcastle et du Met-Office). Pour cette étude, nous avons utilisé quatre outils de tra-
2574 cking différents appliqués aux mêmes champs de cumuls de précipitation en une heure

2575 d'un ensemble de 15 CP-RCMs du FPS Convection sur le domaine pan-alpin ALP-3i et
2576 à des données observées de précipitation à haute résolution (COMEPHORE, GRIPHO,
2577 RdisaggH et RADKLIM), pour la période 2001-2009 :

- 2578 • l'outil OSIRIS du CNRM pour ma part ;
- 2579 • l'outil MTD ou MODE pour l'ICTP, outil utilisé également par Andreas Prein
2580 (NCAR) pour le tracking des MCSs américains (Davis et al, 2006) ;
- 2581 • l'outil DYMECS pour le Met-Office (Stein et al, 2014) ;
- 2582 • l'outil Celltrack récemment développé par le KNMI (Lochbihler et al, 2017).

2583 Si les outils de tracking diffèrent, en particulier pour l'appariement des cellules précipitantes
2584 pour former des trajectoires, un protocole commun de sélection des systèmes précipitants
2585 a été défini, en accord avec les différents groupes. Ce protocole de sélection des événements
2586 de fortes précipitations diffère un peu de la méthode de sélection définie pour mes études.
2587 Après avoir interpolé les champs de précipitation sur la grille commune régulière ALP3-i
2588 et appliqué un lissage avec une moyenne pondérée des huit points de grille adjacents, le
2589 seuil de 5 mm/h est choisi et les systèmes sélectionnés sont ceux dont le nombre total de
2590 points de grille au dessus de 5 mm/h sur l'ensemble de la trajectoire est supérieur à 100.
2591 La période d'étude s'étend à toute l'année.

2592 Cette étude comprend deux parties : une étude d'inter-comparaison des outils de tra-
2593 cking, puis une étude d'évaluation des CP-RCMs de l'ensemble du FPS Convection avec
2594 l'approche lagrangienne.

2595 Dans une première partie, une inter-comparaison des outils de tracking est donc réalisée.
2596 Deux études de cas sont tout d'abord étudiés : l'événement exceptionnel par son ampleur
2597 et son intensité qui a touché le Gard en septembre 2002 et un événement plus localisé,
2598 celui de Carrara en Italie en septembre 2003. Par la suite, les climatologies des événements
2599 précipitants simulés par les CP-RCMs et de ceux observés, obtenues par chaque outil de
2600 tracking, sont comparées deux à deux. Que ce soit pour les études de cas ou les climatolo-
2601 gies (cf. Figure 3.13), nous avons constaté que, s'il existe des différences quantitatives, tous
2602 les outils de tracking produisent des résultats qualitativement égaux en ce qui concerne
2603 les différentes caractéristiques des trajectoires (nombre de trajectoires, fréquence, intensité
2604 moyenne et maximale, durée, surface, volume). Cela implique donc que, quelque soit l'outil
2605 de tracking utilisé, des conclusions scientifiques équivalentes pourront être tirées. Ce résul-
2606 tat suggère également que tous les outils de tracking étudiés sont des outils d'analyse fiables
2607 pour étudier les événements fortement précipitants du nord-ouest de la Méditerranée.

2608 L'ensemble des simulations des CP-RCMs est ensuite évalué, par comparaison avec les
2609 données observées. Nous avons constaté une bonne performance globale de la moyenne
2610 de l'ensemble des CP-RCMs pour simuler les événements fortement précipitants du nord-
2611 ouest de la Méditerranée. En particulier, les modèles reproduisent bien les zones touchées
2612 par les fortes précipitations et les caractéristiques de ces événements sont relativement
2613 bien représentées, en particulier pour les intensités moyennes de précipitation. On peut
2614 toutefois noter certains biais. Ainsi, les simulations ont tendance à surestimer l'occurrence
2615 des événements précipitants sur le relief, même s'il est difficile de quantifier ce biais, sachant
2616 que les données observées sous-estiment les précipitations dans les zones montagneuses.

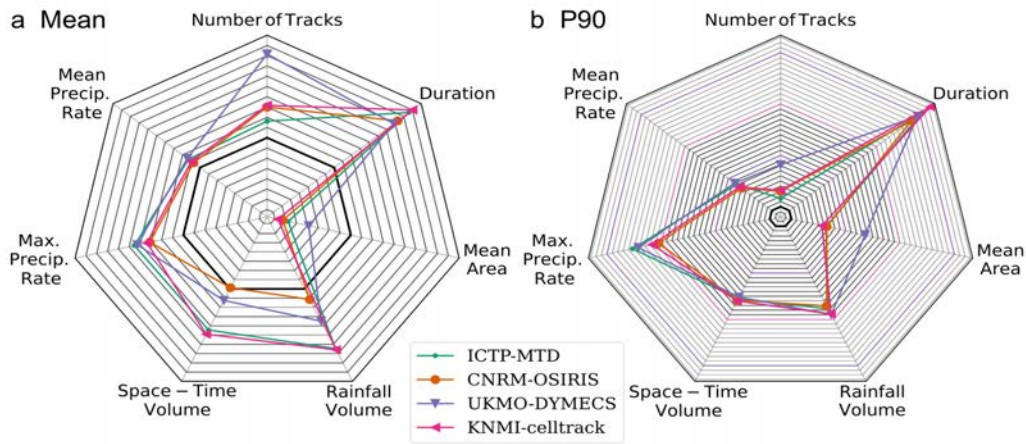


FIGURE 3.13 – Biais relatif pour (a) la moyenne et (b) le percentile 90 des propriétés des trajectoires sélectionnées pour chaque outil de tracking pour la moyenne de l'ensemble du FPS Convection par rapport aux observations (en %). Les lignes noires pleines sont des incréments de $+5\%$, la ligne noire en gras représente les observations, c'est-à-dire 0% (Müller et al, 2022)

2617 Par contre, en été, les simulations sous-estiment leur occurrence en plaine, ce qui pourrait
 2618 s'expliquer soit par des problèmes de déclenchement des orages d'origine thermique, soit
 2619 par le fait que la dynamique de ces modèles n'est pas encore suffisamment résolue pour
 2620 simuler ces phénomènes de petite échelle. Mises à part les surfaces moyennes qui sont sous-
 2621 estimées (-27%), les autres caractéristiques ont tendance à être surestimées par la moyenne
 2622 de l'ensemble, comme les durées ($+37\%$), les intensités maximales ($+20\%$) ou le volume
 2623 ($+17\%$). Nous avons également constaté que les biais dans les propriétés spatio-temporelles
 2624 des événements de précipitation sont réduits lorsqu'on utilise, pour l'évaluation des CP-
 2625 RCMs, des données d'observation combinant radar et pluviomètres, ce qui pousserait à
 2626 privilégier leur utilisation.

2627 L'article ne détaille pas le comportement des différentes simulations au sein de l'en-
 2628 semble, mais la Figure 8 du Supplementary Material, qui donne les biais pour chaque
 2629 simulation et pour toute l'année, indique des comportements qui peuvent être assez diffé-
 2630 rents suivant les simulations. On retrouve, par exemple, la sous-estimation des intensités
 2631 maximales par CNRM-AROME indépendamment de la méthode de tracking utilisée. Mais
 2632 si l'on compare les biais à ceux obtenus pour les épisodes méditerranéens français de l'au-
 2633 tomne (Section 3.2), les résultats peuvent être parfois assez différents : si l'on retrouve,
 2634 pour toute l'année et sur une zone plus étendue, la surestimation des durées et des vo-
 2635 lumes, les surfaces sont ici sous-estimées, alors qu'elles sont surestimées si l'on se limite
 2636 aux systèmes précipitants français de l'automne. Cela indiquerait donc des comportements
 2637 et biais différents suivant les phénomènes étudiés et leur saison d'occurrence.

2638 **3.4 Synthèse de l'évaluation des CP-RCMs pour la** 2639 **simulation des épisodes méditerranéens**

2640 **3.4.1 Points forts**

2641 Si quelques études montraient déjà la valeur ajoutée des CP-RCMs par rapport aux
2642 RCMs pour la représentation des précipitations et en particulier des précipitations ex-
2643 trêmes, il était encore nécessaire de confirmer cette valeur ajoutée pour les épisodes mé-
2644 diterranéens. Nous avons ici comparé les extrêmes de précipitation de l'automne simulés
2645 par les CP-RCMs et les RCMs (percentile 99% de précipitation quotidienne et percen-
2646 tile 99.9% de précipitation horaire) à des données observées à haute résolution spatiale et
2647 temporelle. Cela a été fait à la fois pour une longue période en mode mono-modèle avec
2648 CNRM-AROME (Caillaud et al, 2021) et également pour une période de dix ans en mode
2649 multi-modèle grâce à l'ensemble du FPS Convection (extension de Ban et al (2021) à la
2650 saison d'automne). Dans la grande majorité des couples CP-RCM/RCM, la valeur ajoutée
2651 des CP-RCMs par rapport aux RCMs à résolution plus grossière et convection profonde
2652 paramétrisée a été confirmée pour les extrêmes de précipitation de l'automne dans la zone
2653 pan-alpine, que ce soit pour leur localisation ou leur intensité, et en particulier pour le pas
2654 de temps horaire.

2655 Cette bonne représentation des précipitations horaires par les CP-RCMs a permis de
2656 dépasser l'approche eulérienne classique et d'appliquer une approche lagrangienne aux si-
2657 mulations de CP-RCMs en utilisant l'outil OSIRIS de suivi et de détection des systèmes
2658 précipitants. Cette méthode a été appliquée à la fois aux données observées, à une simula-
2659 tion de vingt ans de CNRM-AROME (Caillaud et al, 2021) et aux simulations de dix ans
2660 d'un ensemble de CP-RCMs du FPS Convection. La comparaison des différentes caractéris-
2661 tiques des systèmes précipitants de l'automne observés et simulés par les CP-RCMs montre
2662 également le bon comportement de cette nouvelle génération de modèles de climat : ces
2663 modèles à haute résolution et convection profonde explicite sont capables de représenter
2664 correctement les principales propriétés de ces systèmes, en termes de nombre et de posi-
2665 tionnement géographique, mais aussi sur le pourtour méditerranéen français, en termes de
2666 durée, d'intensité, de surface, de volume, de vitesse et de sévérité (malgré des biais qui sont
2667 précisés ci-après). Il a été également montré que les CP-RCMs sont capables de produire
2668 des événements intenses et sévères, comme il en existe dans les observations.

2669 L'utilisation et la comparaison de plusieurs outils de tracking pour un même ensemble de
2670 simulations d'évaluation du FPS Convection (Müller et al, 2022) a permis de montrer que,
2671 malgré des différences quantitatives, des conclusions qualitatives similaires pouvaient être
2672 données sur l'aptitude des CP-RCMs à représenter les systèmes précipitants, quelque soit
2673 l'algorithme utilisé. Cette étude et sa comparaison aux résultats de Caillaud et al (2021)
2674 ont également montré que les biais des modèles par rapport aux observations pouvaient
2675 différer lorsque l'on s'intéressait à une saison et/ou une zone géographique différente (toute
2676 l'année et toute la zone couverte par les observations pour l'étude multi-tracker, l'automne
2677 et le sud-est de la France pour Caillaud et al (2021)). Il semblerait donc que les biais des

2678 modèles dépendent du phénomène regardé et donc du type de convection associé. Cela
2679 doit donc nous inciter à porter une attention particulière dans la définition des objets
2680 que l'on cherche à étudier avec une approche lagrangienne, afin de mieux comprendre le
2681 comportement des modèles et leur éventuelle limitation pour simuler ces phénomènes.

2682 La simulation de CNRM-AROME est la seule pour laquelle le RCM utilise le pilotage
2683 spectral afin de s'assurer de conserver la cohérence de la grande échelle avec les réanalyses.
2684 La bonne représentation de la fréquence et de la variabilité interannuelle des épisodes
2685 méditerranéens par le CP-RCM, ainsi que du nombre de trajectoires a ainsi pu être montrée.
2686 Cela met en évidence l'intérêt du pilotage spectral pour ces études d'évaluation car le fait
2687 de disposer des meilleures conditions aux limites au bord du CP-RCM permet une meilleure
2688 évaluation. La simulation CCLM-JLU forcée directement par la réanalyse ERA-Interim sur
2689 un domaine plus petit que le domaine pan-européen du Met-Office montre également des
2690 résultats très bons pour toutes les caractéristiques, et en particulier pour le nombre de
2691 systèmes.

2692 3.4.2 Limitations

2693 Une importante limitation pour réaliser des études d'évaluation de modèles de climat à
2694 haute résolution et quantifier leur valeur ajoutée est la nécessité de disposer de données de
2695 référence adaptées, c'est-à-dire de bases de données observées à haute résolution spatiale et
2696 temporelle, de bonne qualité et disponibles sur de longues périodes. Même s'il y a encore
2697 quelques problèmes, notamment de masque en haute altitude, la combinaison des données
2698 radar et stations semble indispensable pour obtenir des observations spatialisées de préci-
2699 pitation fiables sur terre. Pour la zone concernée par les épisodes méditerranéens, seule la
2700 France possède ce type de base de données avec COMEPHORE et cela explique que l'éva-
2701 luation plus approfondie des caractéristiques des systèmes précipitants se soit concentrée
2702 sur la zone French MED. Le manque de données de référence sur mer, zone où certains
2703 systèmes peuvent prendre naissance, est un facteur limitant pour évaluer correctement les
2704 modèles et comprendre leurs biais éventuels.

2705 La durée relativement courte (dix ans) des simulations de l'ensemble du FPS Convec-
2706 tion constitue une autre limitation à cette étude, compte-tenu de la grande variabilité
2707 interannuelle des épisodes méditerranéens. Il est, par exemple, dommage que l'année parti-
2708 culièrement active de 2014 ne fasse pas partie de la période d'évaluation en multi-modèle.
2709 Toutefois, la longue simulation avec CNRM-AROME permet d'étendre ces résultats. De
2710 plus, contrairement aux GCMs pour lesquels ce type d'évaluation n'est pas possible, le
2711 forçage aux bords par des réanalyses rend possible la comparaison directe avec les observa-
2712 tions, sur des périodes qui peuvent donc être plus courtes que celles utilisées classiquement
2713 pour représenter les indices climatiques.

2714 Une autre limitation réside dans la construction de l'ensemble de CP-RCMs du FPS
2715 Convection utilisé dans cette étude qui est un ensemble "d'opportunité" où chaque groupe
2716 a réalisé des simulations avec le CP-RCM disponible dans son institut. Ainsi, on compte un

2717 nombre différent de simulations par famille de CP-RCMs : certaines familles sont surreprésentées
2718 comme la famille CCLM qui a donc plus de poids dans la moyenne de l'ensemble,
2719 alors que d'autres n'ont qu'une seule simulation, comme RegCM, REMO ou UM. Cette
2720 disproportion pousse à ne pas se limiter à l'étude de la moyenne de l'ensemble et confirme
2721 l'intérêt de s'intéresser aux simulations de manière individuelle. De même, la diversité des
2722 protocoles de simulation peut être signalée avec, par exemple, un forçage direct pour deux
2723 simulations, du pilotage spectral dans un RCM, des choix des modèles intermédiaires, des
2724 fréquences et des zones de couplage différents, ce qui rend plus difficile l'interprétation des
2725 résultats.

2726 Si les modèles représentent de manière satisfaisante les principales caractéristiques des
2727 systèmes précipitants de l'automne, des biais ont toutefois été mis en évidence. Certains
2728 biais se retrouvent dans toutes les simulations comme la surestimation du nombre de sys-
2729 tèmes précipitants sur le relief (que l'on peut difficilement quantifier compte-tenu de la
2730 sous-estimation des observations sur les montagnes), la surestimation des durées ou des
2731 vitesses de propagation. D'autres biais sont plus marqués suivant les CP-RCMs, comme la
2732 sous-estimation au pied des Cévennes qui est plus limitée pour les simulations avec AROME
2733 et CCLM-ETHZ, et plus marquée pour les autres simulations. D'autres biais sont différents
2734 suivant les CP-RCMs, comme par exemple, un nombre de trajectoires sélectionnées beau-
2735 coup plus important avec WRF-IPSL ou plus petit avec REMO-GERICS, des intensités
2736 maximales plus fortes avec RegCM-ICTP, une surestimation plus marquée des durées et
2737 des surfaces, et donc des volumes et sévérités par le REMO-GERICS. Dans cette étude
2738 d'évaluation où toutes les simulations sont forcées par la même réanalyse ERA-Interim,
2739 on peut noter des biais proches pour les familles de CP-RCMs AROME et CCLM. Pour
2740 AROME, nous retrouvons également certains biais connus du modèle en PNT, comme la
2741 surestimation des surfaces. Les biais des simulations avec RegCM et REMO qui sont tous
2742 deux des versions non-hydrostatiques de RCM nouvellement développés sont plus impor-
2743 tants que ceux des autres simulations qui sont basées sur des CPMs ayant fait leur preuve
2744 en PNT et bénéficiant donc de l'expérience de la PNT. L'amélioration de ces nouveaux
2745 modèles est en cours et par exemple, une nouvelle version de RegCM a déjà été développée
2746 depuis que ces simulations ont été réalisées (Giorgi et al, 2023). Toutefois, ces différences
2747 de comportement entre CP-RCMs montrent l'intérêt de conserver de la diversité au sein
2748 des modèles de climat à l'échelle kilométrique, afin de bénéficier des points forts de chaque
2749 modèle, qui ne sont pas forcément les mêmes.

2750 3.4.3 Bilan

2751 Cette étude d'évaluation des CP-RCMs pour les épisodes méditerranéens a ainsi permis
2752 de mettre en évidence que :

- 2753 • les modèles de climat régionaux à convection profonde résolue sont les outils de mo-
2754 délisation appropriés pour l'étude des systèmes précipitants des épisodes méditerra-
2755 néens. De plus, disposer d'un ensemble de CP-RCMs constitue une réelle opportunité
2756 et un avantage pour l'étude de ces phénomènes extrêmes ;

2757 • l'approche objet est la méthode appropriée pour évaluer cette nouvelle génération
2758 de modèle et son aptitude à représenter les épisodes méditerranéens, ainsi que pour
2759 caractériser les principales propriétés des systèmes précipitants.

2760 La bonne performance et la valeur ajoutée des CP-RCMs pour les systèmes fortement
2761 précipitants de l'automne permettent d'accorder une plus grande confiance en ces nouveaux
2762 modèles et donc en leurs projections futures. Cette étude a également permis de confirmer
2763 le choix de la méthode à utiliser pour les analyser. Dans le prochain chapitre, cette double
2764 approche pourra donc être utilisée pour l'étude des projections climatiques des épisodes
2765 méditerranéens au cours du 21e siècle.

2766 **Chapitre 4**

2767 **Evolution future des épisodes**
2768 **méditerranéens par un ensemble de**
2769 **CP-RCMs**

2770 **Sommaire**

2771	4.1	Approche eulérienne	160
2772			
2773	4.2	Approche lagrangienne	163
2774	4.2.1	Résumé de l'article en français	164
2775	4.2.2	Article en révision dans Geophysical Research Letters	166
2776	4.3	Synthèse de l'évolution future des épisodes méditerranéens	
2777		par un ensemble de CP-RCMs	217
2778	4.3.1	Points forts	217
2779	4.3.2	Limitations	220
2780	4.3.3	Bilan	222

2784 Ce chapitre est consacré aux projections climatiques des épisodes méditerranéens issues
2785 de l'ensemble de CP-RCMs du FPS Convection forcés par des GCMs de l'exercice CMIP5
2786 pour la plupart et selon le scénario de fortes émissions RCP8.5. Les changements des
2787 différentes caractéristiques des systèmes fortement précipitants de l'automne sont mis en
2788 évidence par comparaison des simulations historiques représentatives du climat présent et
2789 des simulations scénarios représentatives d'un climat futur plus chaud pour le milieu et la
2790 fin de siècle.

2791 Dans une première partie, quelques statistiques eulériennes classiques sont rapidement
2792 présentées pour l'ensemble du FPS Convection et pour les simulations de vingt ans de
2793 CNRM-AROME.

2794 La deuxième partie est présentée sous la forme d'un article en révision à la revue Geo-
2795 physical Research Letters avec l'approche lagrangienne appliquée à l'ensemble des simula-
2796 tions du FPS Convection. Nous nous attachons en particulier à préciser l'accord qualitatif
2797 entre modèles et à distinguer les changements robustes de ceux qui restent encore incertains.

2798 Dans les deux approches, avant de passer à l'étude des projections futures, il faut
2799 préalablement vérifier la capacité des CP-RCMs à reproduire les principales caractéristiques
2800 des épisodes méditerranéens lorsqu'ils sont forcés au bord, non plus par le meilleur forçage
2801 disponible, c'est-à-dire par les réanalyses comme au chapitre 3, mais par les simulations
2802 historiques des GCMs.

2803 4.1 Approche eulérienne

2804 Pour cette approche, j'ai eu l'opportunité de participer à une étude multi-modèle pilotée
2805 par Emanuela Pichelli (ICTP), en collaboration avec différents groupes de recherche du
2806 FPS Convection. Comme pour l'étude de Ban et al (2021), chaque groupe a interpolé ses
2807 données sur la grille ALP-3i, puis calculé les différents indicateurs. J'ai ainsi participé à
2808 cette étude pour les données des simulations historiques et scénarios de CNRM-AROME
2809 et de CNRM-ALADIN, et également pour les observations de COMEPHORE. Cette étude
2810 a également donné lieu à une publication dans *Climate Dynamics* :

2811 Pichelli, E., Coppola, E., Sobolowski, S., Ban, N., Giorgi, F., Stocchi P., Alias A.,
2812 Belusic, D., Berthou, S., Caillaud, C., M. Cardoso, R., Chan, S., Bossing Christensen,
2813 O., Dobler, A., de Vries, H., Goergen, K., J. Kendon, E., Keuler, K., Lenderink, G., Lo-
2814 renz, T., N. Mishra, A., Panitz, H-J., Schär, C., M. M. Soares, P., Truhetz, H., Vergara-
2815 Prado, J. (2021) **The first multi-model ensemble of regional climate simula-
2816 tions at kilometer-scale resolution part 2 : historical and future simulations of
2817 precipitation.** *Clim Dyn.* <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05657-4>

2818 Cette étude présente les premiers résultats de projections climatiques basés sur un en-
2819 semble de douze simulations de dix ans de CP-RCMs en climat présent et futur sur le
2820 domaine pan-alpin pour les saisons d'été (JJA) et d'automne (SON). Nous nous concen-
2821 trons ici sur les résultats obtenus pour l'automne qui est notre saison d'intérêt. Les figures
2822 principales pour les extrêmes de pluie de Pichelli et al (2021) ont été retracées pour per-
2823 mettre la comparaison avec CNRM-AROME grâce aux données partagées par Emanuela
2824 Pichelli.

2825 Avant de passer à l'étude des changements projetés, la première étape a été de vérifier
2826 que les simulations historiques représentaient correctement les précipitations de l'automne
2827 et en particulier les précipitations extrêmes par comparaison aux observations à haute
2828 résolution. Les résultats confirment la bonne performance de l'ensemble des CP-RCMs
2829 qui avait été trouvée dans Ban et al (2021) pour les simulations d'évaluation, ainsi que la
2830 valeur ajoutée des CP-RCMs par rapport à leurs RCMs forceurs. En effet, une meilleure
2831 représentation des structures de petite échelle des précipitations est mise en évidence,
2832 ainsi qu'une réduction des biais par rapport aux observations pour la plupart des indices
2833 statistiques et en particulier pour les extrêmes horaires de précipitation (cf. Figure 4.1).

2834 Les changements futurs proposés dans cet ensemble de CP-RCMs sont ensuite étudiés
2835 et comparés à ceux proposés par les RCMs. Pour la fin de siècle et selon le scénario RCP8.5,
2836 les deux ensembles s'accordent pour une augmentation générale des précipitations extrêmes
2837 de l'automne au travers des percentiles quotidiens 99% et des percentiles horaires 99.9%

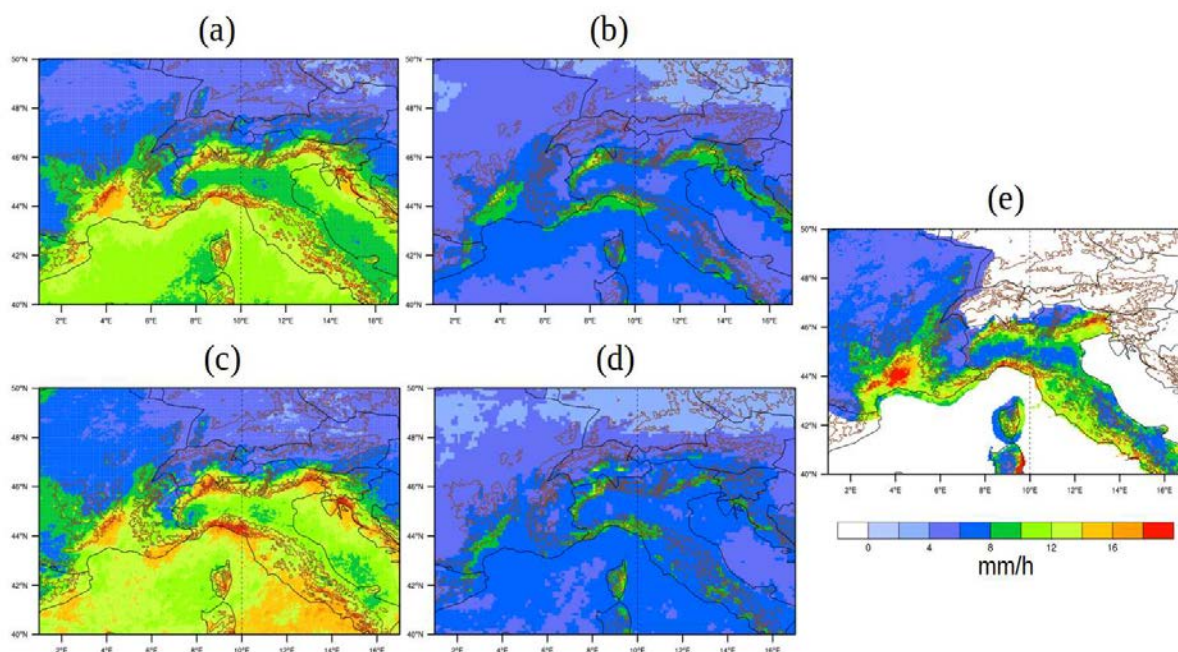


FIGURE 4.1 – Extrêmes horaires de précipitation de l'automne (percentiles 99.9% des précipitations horaires) pour les simulations historiques de dix ans (1996-2005, SON) pour (a) un ensemble de 12 CP-RCMs du FPS Convection (2-3 km), (b) un ensemble de 12 RCMs (12-15 km), d'après Pichelli et al (2021), pour des simulations historiques de 20 ans (1986-2005, SON) pour (c) le CP-RCM CNRM-AROME (2.5 km), (d) le RCM CNRM-ALADIN (12.5 km) et (e) les observations (COMEPHORE sur la France et GRIPHO sur l'Italie). Sur toutes les figures, l'orographie (750 m) est représentée par des lignes marrons

2838 (cf. Figure 4.2 a, b et Figure 4.3 a, b), plus marquée pour le pas de temps horaire. Seul le
 2839 sud-ouest de la zone au pas de temps quotidien est concerné par une diminution. Les chan-
 2840 gements relatifs proposés par l'ensemble de CP-RCMs sont généralement plus prononcés
 2841 que ceux simulés par les RCMs. Toutefois, les box plots pour les deux ensembles indiquent
 2842 des différences notables entre simulations suivant les zones, et notamment sur notre zone
 2843 d'intérêt du Sud France (cf. Figures 4.2, 4.3 et Table 4.1). Ainsi, dans cette zone, les va-
 2844 leurs de changement sont comprises entre -13 et +25% au pas de temps quotidien et entre
 2845 -1 et +33% pour le pas de temps horaire pour l'ensemble de CP-RCMs. On peut noter
 2846 que quatre simulations proposent une diminution des extrêmes de précipitation au pas de
 2847 temps quotidien et deux simulations ont des valeurs légèrement négatives ou proches de
 2848 zéro au pas de temps horaire sur cette zone.

2849 Les changements des extrêmes quotidien et horaire de précipitation sont également
 2850 présentés pour les simulations de vingt ans du modèle CNRM-AROME (cf. Figure 4.2 c, d et
 2851 Figure 4.3 c, d) avec l'ajout d'une indication sur leur significativité. Ainsi, les changements
 2852 ne sont tracés que s'ils sont significatifs à 90% selon une méthode de bootstrap définie
 2853 en 2.6.2. On retrouve une augmentation des percentiles sur une grande partie du domaine
 2854 pan-alpin, plus marquée à l'échelle horaire et avec des valeurs généralement plus fortes pour
 2855 ce modèle que pour la moyenne multi-modèle (cf. Table 4.1). Les changements proposés
 2856 par CNRM-AROME et CNRM-ALADIN sont assez peu différents à l'échelle quotidienne,

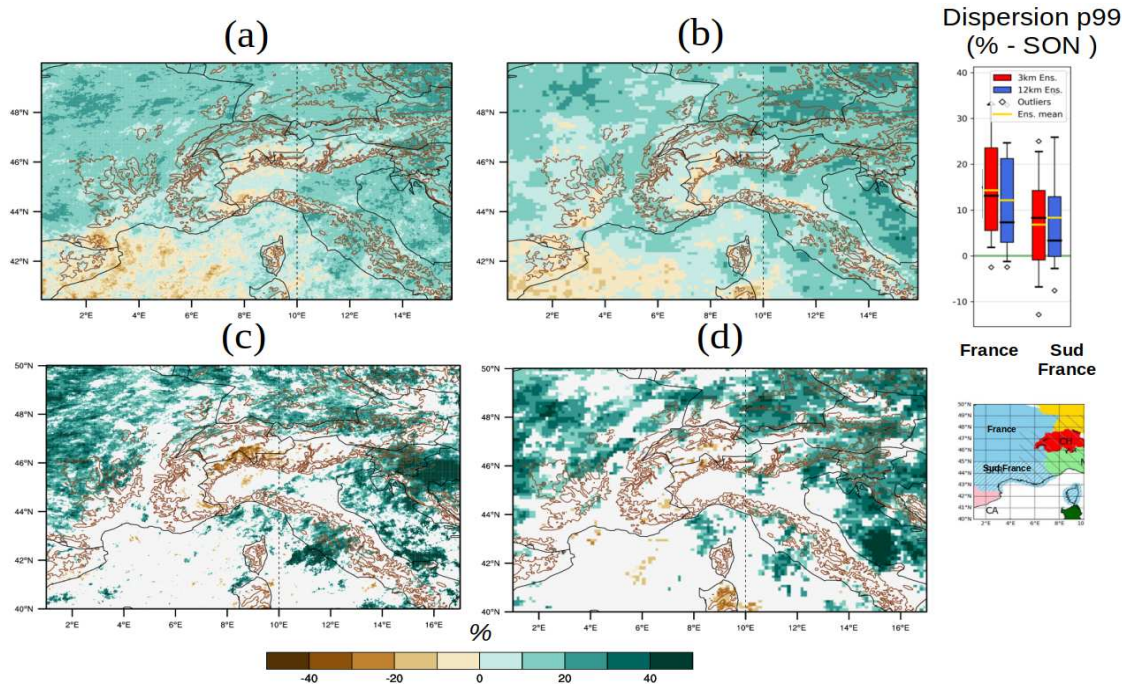


FIGURE 4.2 – Changements relatifs des extrêmes quotidiens de précipitation de l’automne (percentiles 99% des précipitations quotidiennes) entre les simulations fin de siècle (2090-2099) et historique (1996-2005) pour des simulations de 10 ans en automne (SON) pour (a) un ensemble de 12 CP-RCMs du FPS Convection (2-3 km) et (b) un ensemble de 12 RCMs (12-15 km), ainsi que le box-plot de la distribution des changements pour les CP-RCMs et les RCMs pour les zones France et Sud France, d’après Pichelli et al (2021), et pour des simulations de 20 ans (1986-2005 et 2080-2099) en automne (SOND) pour (c) le CP-RCM CNRM-AROME (2.5 km) et (d) le RCM CNRM-ALADIN (12.5 km) (les différences ne sont tracées que si elles sont significatives à 90% selon une méthode de bootstrap). Sur toutes les figures, l’orographie (750 m) est représentée par des lignes marrons.

2857 mais les changements du CP-RCM sont plus prononcés à l’échelle horaire et ne concernent
 2858 pas exactement les mêmes zones, notamment la plaine de Pô en Italie où CNRM-AROME
 2859 ne propose pas de signal significatif ou l’est du Massif Central où seul CNRM-AROME
 2860 propose une augmentation. Les signaux sont rarement significatifs sur mer. Sur le sud-est
 2861 de la France, il n’y a pas de changement significatif au pas de temps quotidien et le signal
 2862 est non significatif sur une bonne partie de la zone au pas de temps horaire, ce qui ne
 2863 permet pas d’indiquer de réponse claire.

2864 Concernant les changements de statistiques eulériennes classiques avec des CP-RCMs à
 2865 l’échelle quotidienne, on retrouve donc des résultats proches de ceux obtenus lors d’études
 2866 précédentes avec des RCMs comme Coppola et al (2021a) ou Trambly and Somot (2018) :
 2867 une tendance à l’augmentation de la moyenne de l’ensemble de CP-RCMs, mais encore
 2868 beaucoup d’incertitude au sein de cet ensemble, notamment sur le sud-est de la France où
 2869 les simulations de vingt ans de CNRM-AROME indiquent des changements souvent non
 2870 significatifs. A l’échelle horaire qui, jusqu’à présent, avait été peu étudiée sur cette zone, on
 2871 note également une tendance à l’augmentation des précipitations extrêmes avec un signal
 2872 plus prononcé lorsqu’on compare la réponse des CP-RCMs à celle des RCMs. Fumière

Changements relatifs (%)	France		Sud France	
	Moy Ensemble CP-RCMs	Moy Ensemble RCMs	Moy Ensemble CP-RCMs	Moy Ensemble RCMs
Percentile 99% quotidien (SON)	+14 [-2 ; +33]	+12 [-2 ; +32]	+7 [-13 ; +25]	+8 [-8 ; +35]
	CNRM-AROME	CNRM-ALADIN	CNRM-AROME	CNRM-ALADIN
10 ans (SON)	+11	+7	+6	+2
20 ans (SOND)	+15 (+11)	+12 (+9)	+8 (+4)	+3 (+1)
Percentile 99.9% horaire (SON)	+24 [+10 ; +45]	+20 [+4 ; +45]	+18 [-1 ; +33]	+16 [-1 ; +44]
	CNRM-AROME	CNRM-ALADIN	CNRM-AROME	CNRM-ALADIN
10 ans (SON)	+19	+13	+19	+12
20 ans (SOND)	+28 (+20)	+18 (+15)	+22 (+14)	+12 (+8)

Tableau 4.1 – Changements relatifs des extrêmes quotidien et horaire de précipitation de l’automne entre les simulations fin de siècle et historique pour les zones France et Sud France pour la moyenne des ensembles de 12 CP-RCMs et de 12 RCMs de Pichelli et al (2021) (les valeurs minimales et maximales sont indiquées entre crochets), ainsi que les valeurs de CNRM-AROME et CNRM-ALADIN pour les périodes de 10 ans de Pichelli et al (2021) et pour les périodes de 20 ans (les valeurs entre parenthèses correspondent aux valeurs calculées seulement sur les points où les différences sont statistiquement significatives à 90% selon une méthode de bootstrap).

2873 (2019) avait montré l’absence d’accord au sein d’un sous ensemble de quatre simulations
2874 sur le signe des changements sur le sud-est de la France. On retrouve, dans l’ensemble élargi
2875 ici à douze simulations, des divergences importantes entre les simulations sur la réponse
2876 des extrêmes de précipitation, en particulier sur la région méditerranéenne française.

2877 Les incertitudes mises en évidence dans les statistiques eulériennes sur notre zone d’in-
2878 térêt nous engagent à mettre en oeuvre l’approche lagrangienne afin d’aller plus loin dans
2879 l’analyse des changements, concernant notamment les propriétés intrinsèques des événe-
2880 ments (taille, durée, vitesse, sévérité).

2881 4.2 Approche lagrangienne

2882 Les résultats sont présentés au travers de l’article suivant en révision à la revue Geo-
2883 physical Research Letters :

2884 Caillaud, C., Somot, S., Douville, H., Alias, A., Bastin, S., Brienen, S., Demory M-
2885 E., Dobler A., Feldmann H., Frisius T., Goergen K., Kendon E. J., Keuler K., Len-
2886 derink G., Mercogliano P., Pichelli E., Soares P. M.M, Tölle M. H., de Vries, H. **Me-**
2887 **diterranean Heavy Precipitation Events in a warmer climate : robust ver-**
2888 **sus uncertain changes with a large convection-permitting model ensemble.**
2889 <https://www.authorea.com/doi/full/10.22541/essoar.168987136.64498273>

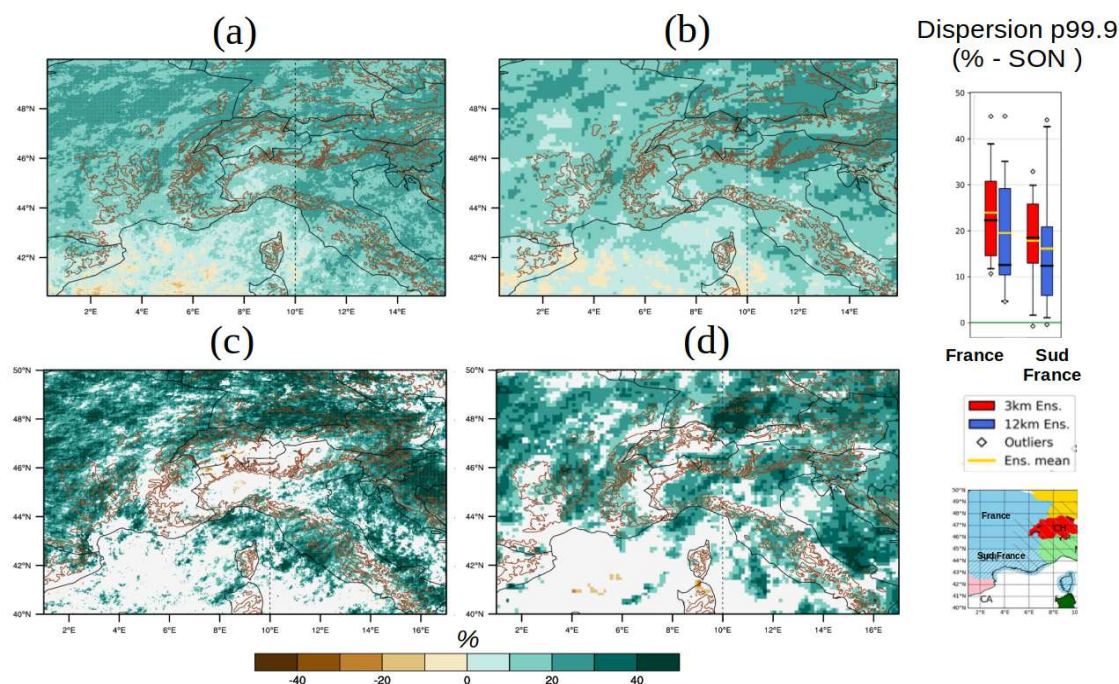


FIGURE 4.3 – Identique à la Figure 4.2, mais pour les changements des extrêmes horaires de précipitation de l’automne (percentiles 99.9% des précipitations horaires)

2890 Points clés

- 2891 • Un ensemble à haute résolution et une approche orientée objet offrent une opportunité
- 2892 unique pour étudier les changements futurs des épisodes méditerranéens.
- 2893 • Un accord robuste est trouvé pour une augmentation de l’intensité, de la surface et
- 2894 du volume des futurs épisodes de fortes précipitations sur la zone méditerranéenne
- 2895 française.
- 2896 • Malgré la simulation explicite de la convection profonde, une incertitude considérable
- 2897 demeure quant au degré d’intensification des événements les plus extrêmes.

2898 4.2.1 Résumé de l’article en français

2899 Dans un contexte de changement climatique, les possibles changements de fréquence
 2900 et d’intensité des épisodes méditerranéens soulèvent des attentes sociétales fortes. Cette
 2901 étude se base sur un ensemble de quatorze simulations de CP-RCMs du FPS convection
 2902 forcées par des GCMs de l’exercice CMIP5 pour la plupart et pour des périodes de dix ans
 2903 en historique, milieu de siècle et fin de siècle selon le scénario à fortes émissions RCP8.5.
 2904 L’approche lagrangienne dont l’intérêt a été démontré au chapitre 3 est mise en oeuvre et
 2905 l’algorithme OSIRIS de détection et de suivi des systèmes précipitants est donc appliqué
 2906 aux cumuls horaires de précipitation des différentes simulations.

2907 L’étape préliminaire est la vérification de la capacité des différentes simulations histo-
 2908 riques de CP-RCMs à reproduire correctement les principales caractéristiques des systèmes
 2909 précipitants de l’automne. Cela est fait par comparaison avec les données des trajectoires

2910 obtenues à partir des données observées à haute résolution (COMEPHORE et GRIPHO).
2911 Il est notamment démontré que les simulations historiques proposent une bonne repré-
2912 sentation spatiale des zones connues pour être affectées par les épisodes méditerranéens,
2913 même s'il existe des différences significatives entre les simulations qui peuvent s'expliquer
2914 à la fois par le choix du CP-RCM et par celui du modèle forceur. On montre toutefois une
2915 surestimation du nombre de systèmes précipitants sur les régions montagneuses et l'Ita-
2916 lie, ainsi qu'une sous-estimation du nombre de systèmes précipitants dans les contreforts
2917 des Cévennes par rapport aux observations, dans une moindre mesure avec les simulations
2918 AROME. Dans la zone méditerranéenne française, les simulations historiques représentent
2919 correctement les principales caractéristiques des systèmes fortement précipitants de l'au-
2920 tomne en termes de durée, d'intensité, de surface, de volume, de vitesse de propagation
2921 et de sévérité, malgré quelques biais significatifs. Les durées et les vitesses de propagation
2922 sont ainsi surestimées par la quasi-totalité des simulations. Pour les simulations AROME
2923 et RegCM, et plus encore pour REMO, on constate une surestimation significative des vo-
2924 lumes, liée à des systèmes qui durent trop longtemps et qui ont des surfaces trop grandes.
2925 RegCM simule également des intensités maximales trop élevées, alors qu'AROME-CNRM
2926 les sous-estime. A défaut de diagnostics plus approfondis sur les mécanismes sous-jacents,
2927 nous n'avons donc aucune raison objective d'exclure l'un des couples CP-RCM/GCM éva-
2928 lués en climat présent de notre analyse des changements futurs en réponse aux forçages
2929 anthropiques.

2930 Les changements futurs des fortes précipitations méditerranéennes de l'automne à des
2931 niveaux de réchauffement élevés, c'est-à-dire pour la période de fin de siècle, sont ensuite
2932 étudiés. L'approche multi-modèle permet d'évaluer l'accord qualitatif entre les simulations
2933 disponibles et d'identifier ainsi les changements les plus robustes et ceux qui restent incer-
2934 tains.

2935 Les résultats robustes suivants ont été identifiés :

- 2936 • une augmentation de la fréquence des systèmes fortement précipitants, c'est-à-dire
2937 dont les intensités sont supérieures à 10 mm/h, dans une grande partie du domaine
2938 pan-alpin, en particulier du centre de l'Italie au nord des Balkans où toutes les simu-
2939 lations s'accordent sur le signe du changement ;
- 2940 • une extension substantielle, c'est-à-dire un doublement des zones touchées par les
2941 systèmes fortement précipitants de l'automne sur la zone pan-alpine ;
- 2942 • une influence dominante du GCM forceur, en réponse aux forçages radiatifs et/ou
2943 par variabilité interne, dans la projection des changements de fréquence des épisodes
2944 méditerranéens ;
- 2945 • sur la zone méditerranéenne française, une augmentation des intensités moyennes et
2946 maximales (+0 à +11% et de +3 à +20% respectivement) pour les systèmes fortement
2947 précipitants, avec un accord complet sur le signe du changement entre les simulations ;
2948 une augmentation des surfaces, du volume et de la sévérité, avec un bon accord entre
2949 les simulations (on note toutefois, pour la sévérité, que le changement n'est significatif
2950 que dans moins de la moitié des simulations) ; peu de changement pour les durées et
2951 les vitesses de propagation.

2952 Toutefois, d'importantes incertitudes persistent :

- 2953 • pas d'accord clair entre les modèles pour les changements de fréquence des systèmes
2954 fortement précipitants (dont les intensités sont supérieures à 10 mm/h) sur une par-
2955 tie du domaine pan-alpin et en particulier sur le sud-est de la France, ce qui est
2956 probablement lié à des différences dans les changements de conditions synoptiques
2957 de grande échelle imposées par les GCMs en réponse aux forçages radiatifs et/ou
2958 exprimant leur variabilité interne ;
- 2959 • sur la zone méditerranéenne française, une large gamme de changements possibles
2960 dans les propriétés des systèmes fortement précipitants suivant les simulations, et
2961 y compris si l'on normalise l'augmentation d'intensité par le réchauffement régional
2962 correspondant ;
- 2963 • pour les événements les plus intenses, une large gamme de changements possibles,
2964 que ce soit pour la fréquence (de +38% à +326%) ou pour les valeurs d'intensité
2965 maximale de durée de retour de 20 ans (jusqu'à +95%) qui ne peuvent pas être
2966 facilement expliqués par le choix du CP-RCM ou du GCM forceur ;
- 2967 • des changements minoritaires, mais plausibles, proposés par une simulation qui pro-
2968 jette des systèmes convectifs plus nombreux, avec des durées de vie plus courtes, plus
2969 petits, mais plus intenses.

2970 Les résultats pour le milieu de siècle sont présentés dans le Supporting Information.
2971 Les conclusions sont proches de celles données pour la fin du siècle, mais avec un rapport
2972 signal/bruit plus faible. En effet, les changements des principales caractéristiques des sys-
2973 tèmes précipitants sont proches qualitativement de ceux obtenus en fin de siècle, mais avec
2974 des valeurs plus faibles et une significativité statistique moindre, ce qui peut s'expliquer
2975 par un impact relatif plus fort de la variabilité interne du climat sur le changement de
2976 fréquence. L'accord complet entre les simulations pour une augmentation des intensités
2977 maximales de +1 à +10% en milieu de siècle est toutefois notable.

2978 **4.2.2 Article en révision dans Geophysical Research Letters**

2979 L'article en révision est repris ici, suivi du supplément d'information ("Supporting Infor-
2980 mation") qui comprend l'évaluation des simulations historiques, les figures des simulations
2981 individuelles pour la fin de siècle et les résultats pour le milieu de siècle.

1 **Northwestern Mediterranean Heavy Precipitation**
2 **Events in a warmer climate : robust versus uncertain**
3 **changes with a large convection-permitting model**
4 **ensemble**

5 **Cécile Caillaud¹, Samuel Somot¹, Hervé Douville¹, Antoinette Alias¹, Sophie**
6 **Bastin², Susanne Brienens³, Marie-Estelle Demory^{4,5,6,7}, Andreas Dobler⁸,**
7 **Hendrik Feldmann⁹, Thomas Frisius¹⁰, Klaus Goergen¹¹, Elizabeth J.**
8 **Kendon¹², Klaus Keuler¹³, Geert Lenderink¹⁴, Paola Mercogliano¹⁵, Emanuela**
9 **Pichelli¹⁶, Pedro M. M Soares¹⁷, Merja H. Tölle¹⁸, Hylke de Vries¹⁴**

10 ¹CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, Toulouse, France

11 ²Laboratoire ATmosphère Milieux Observations Spatiales/Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), UVSQ

12 Université Paris-Saclay, Sorbonne Université, CNRS, CNES, Guyancourt, France

13 ³Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach, Germany

14 ⁴Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zurich, Zurich, Switzerland

15 ⁵Wyss Academy for Nature, University of Bern, Bern, Switzerland

16 ⁶Climate and Environmental Physics, Physics Institute, University of Bern, Bern, Switzerland

17 ⁷Oeschger Centre for Climate Change Research, University of Bern, Bern, Switzerland

18 ⁸Norwegian Meteorological Institute, Oslo, Norway

19 ⁹Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, Germany

20 ¹⁰Climate Service Center Germany (GERICS), Helmholtz-Zentrum hereon GmbH, Hamburg, Germany

21 ¹¹Institute of Bio- and Geosciences (IBG-3, Agrosphere), Research Centre Jülich, 52428 Jülich, Germany

22 ¹²Met Office Hadley Centre, Exeter, UK

23 ¹³Chair of Atmospheric Processes, Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg, Cottbus,

24 Germany

25 ¹⁴Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), De Bilt, The Netherlands

26 ¹⁵Fondazione Centro euro-Mediterraneo sui cambiamenti climatici (CMCC), Caserta, Italy

27 ¹⁶The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Trieste, Italy

28 ¹⁷Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal

29 ¹⁸CESR (Center for Environmental Systems Research), University of Kassel, Kassel, Germany

30 **Key Points:**

- 31 • High-resolution ensemble and object-oriented approach offer a unique opportu-
32 nity to study changes in Mediterranean extreme precipitation
- 33 • Robust agreement is found for an increase in intensity, volume and severity for fu-
34 ture French Mediterranean Heavy Precipitation Events
- 35 • Even at convection-permitting scale, considerable uncertainty remains regarding
36 the degree of intensification of the most extreme events

Abstract

Taking advantage of a large ensemble of Convection Permitting-Regional Climate Models on a pan-Alpine domain and of an object-oriented dedicated analysis, this study aims to investigate future changes in the high-impact fall Mediterranean Heavy Precipitation Events at high warming levels. We identify a robust multi-model agreement for an increased frequency from central Italy to the northern Balkans combined with a substantial extension of the affected areas, a dominant influence of the driving Global Climate Models for projecting changes in the frequency, an increase in intensity, area, volume and severity over the French Mediterranean. However, large quantitative uncertainties persist despite the use of convection-permitting models, with no clear agreement in frequency changes over southeastern France and a large range of plausible changes in events' properties, including for the most intense events. Model diversity and international coordination are still needed to provide policy-relevant climate information regarding precipitation extremes.

Plain Language Summary

Despite growing computational resources and multiple model developments, projecting future changes in the high-impact Mediterranean Heavy Precipitation Events remains both a numerical and scientific challenge. The present study takes advantage of the recent availability of a relatively large ensemble of high resolution Regional Climate Models (2-3km), which represent a step change in the simulation of precipitation extremes, and of an object-oriented approach, allowing us to track the convective precipitating systems on an hourly basis. Looking at future changes in fall Mediterranean Heavy Precipitation Events at high warming levels, we identify a robust multi-model agreement for an increased frequency from central Italy to the northern Balkans combined with a substantial expansion of the affected areas, and an increase in intensity, area, volume and severity over the French Mediterranean. However, considerable uncertainties remain in terms of frequency over parts of the domain arising from uncertainty in changes in large scale weather patterns, and in terms of degree of intensification for the most intense events. It suggests the need for model diversity and for more coordinated high resolution climate projections with careful selection of different driving global models in order to provide policy-relevant climate information regarding precipitation extremes.

1 Introduction

In a context of climate change, future changes in the intensity and frequency of High Impact Weather Events (HIWEs) raise large societal concerns at global and regional levels alike. The northwestern Mediterranean is particularly affected by a typical example of convection-driven HIWEs called Heavy Precipitation Events (HPEs) (Ducrocq et al., 2008; Nuissier et al., 2008, 2011; Khodayar et al., 2021): mainly during the fall season, rainfall amounts greater than 100 mm are recorded in less than a day and often within just a few hours and lead to devastating flash flooding causing many fatalities and economic damage. The occurrence of these extreme events can be explained by favourable meteorological conditions, including synoptic and mesoscale weather features, topography and the proximity of the Mediterranean Sea. The combination of these ingredients leads to the formation of slowly-moving or quasi-stationary Mesoscale Convective Systems (MCSs), which explains the exceptional hourly rainfall records.

Concerning observed changes, there is still low confidence in heavy precipitation changes and their attribution over the whole Mediterranean region (Seneviratne et al., 2021). Yet, several studies (Ribes et al., 2019; Vautard et al., 2015; Blanchet et al., 2018; Blanchet & Creutin, 2022) focusing on the French Mediterranean domain showed an observed and potentially human-induced increase in the HPEs intensity and frequency since the middle of the 20th century. The overall trend is consistent with the observed con-

37 comitant regional warming and a super Clausius-Clapeyron (CC) scaling of precipita-
38 tion extremes.

39 Regarding future changes, the latest IPCC AR6 WP1 report indicates that, at the
40 global scale, extreme daily precipitation events are projected to intensify by about 7%
41 per degree of global warming close to the CC rate (Seneviratne et al., 2021). Yet, when
42 focusing on the Mediterranean region, large uncertainties remain with important discrep-
43 ancies in the response of Global Climate Models (GCMs, 150km resolution, e.g. John
44 et al. (2022)) that could be explained by dynamical rather than thermodynamical pro-
45 cesses (Pfahl et al., 2017). Multi-model ensembles based on Regional Climate Models
46 (RCMs, 12km resolution, EURO-CORDEX) still show large uncertainties over this re-
47 gion (Zittis et al., 2021; Rajczak & Schär, 2017; Trambly & Somot, 2018), with, for ex-
48 ample, RX1day changes ranging from -7 to +17% in Coppola et al. (2021). Part of these
49 regional uncertainties may come from a possible but GCM-dependant decrease in the
50 frequency of favourable weather conditions which could offset thermodynamic increases
51 related to increased humidity as a result of warming and thus make unclear the global
52 intensification of the water cycle.

53 Moreover, those studies do not provide any information about the response of sub-
54 daily precipitation. Yet, short duration rainfall extremes are typical manifestations of
55 Mediterranean HPEs produced through small-scale convective motions. Despite sub-grid
56 parametrizations, state-of-the-art GCMs or RCMs typically used in CMIP or CORDEX
57 are not able to account for this mesoscale dynamical response and the resulting extremes
58 (Ban et al., 2021; Caillaud et al., 2021; Pichelli et al., 2021).

59 It was only recently that high resolution (typically 2-3 km) Convection-Permitting
60 RCMs (CP-RCMs) could be run in climate mode (Prein et al., 2020; Lucas-Picher et al.,
61 2021; Kendon et al., 2021). This new generation of RCMs allows a step change in the
62 representation of the convective phenomena with a clear added-value compared to lower
63 resolution climate models with parametrized convection to simulate daily and mostly sub-
64 daily precipitation extremes. The benefit is particularly evident for Mediterranean HPEs
65 given their typical spatial and time scales (Fumière et al., 2020; Berthou et al., 2020; Pichelli
66 et al., 2021; Caillaud et al., 2021). Moreover, CP-RCMs allow us to go beyond the ba-
67 sic Eulerian approach and to set up an object-oriented Lagrangian tracking to study the
68 propagation and intrinsic characteristics of the extreme convective events. This approach
69 was first applied over North America (Prein et al., 2017, 2020; Li et al., 2020) but has
70 also been used to study European HPEs (Kahraman et al., 2021; Chan et al., 2023), Ger-
71 man convective cells (Brisson et al., 2018; Purr et al., 2019, 2021, 2022), as well as Alpine
72 and Northwestern Mediterranean HPEs (Caillaud et al., 2021; Müller et al., 2022, 2023).
73 Thanks to the CORDEX Flagship Pilot Study (FPS) on Convection (Coppola et al., 2020),
74 a first ensemble of kilometre-scale 10-year-timeslice CP-RCM simulations is now avail-
75 able on a common pan-Alpine domain. The extreme precipitation of the hindcast simu-
76 lations driven by atmospheric reanalyses has already been evaluated with both Eule-
77 rian statistics (Ban et al., 2021) and a Lagrangian approach (Müller et al., 2022). The
78 first Eulerian study focusing on late-century changes (Pichelli et al., 2021), extending
79 the results found by Fumière (2019), foresees a stronger intensification of extreme pre-
80 cipitation at hourly rather than daily timescale, but still with large uncertainties, rang-
81 ing from about no change to +34% over South-East of France.

82 In this context, our work aims at providing a more comprehensive and physically-
83 oriented study of future changes in the frequency and properties, including intensity, of
84 the Mediterranean HPEs by taking advantage of:

- 85 • the recent availability of appropriate modelling and diagnostic tools to study north-
86 western Mediterranean HPEs under climate change, i.e. high resolution CP-RCMs
87 and an object-oriented approach that allows the separation between the frequency
88 and the intrinsic characteristics of convective systems,

- the first-of-its-kind large CP-RCMs ensemble available over the common pan-Alpine domain for strong warming levels.

2 Methods

2.1 Models and simulations

We use a large ensemble of fourteen CP-RCMs simulations performed within the CORDEX FPS on Convection program and protocol, that means high resolution (2-3km) non-hydrostatic climate simulations, with explicitly resolved deep convection. Six families of CP-RCM models are included in this study, derived from CPM originally developed for National Weather Prediction purposes for AROME, COSMO-CLM or CCLM, UM and WRF, or newly developed non-hydrostatic high resolution models based on existing RCM (RegCM, REMO).

All the CP-RCM simulations are performed over domains that encompass the common CORDEX FPS pan-Alpine domain called ALP-3 (cf. Figure S1). Only UM-UKMO covers a large pan-European domain (Berthou et al., 2020).

Due to computational limitations, 10-year only periods are simulated for three time slices: 1996–2005, 2041–2050, 2090–2099 (i.e., historical, mid-century and end-century, respectively). The RCP8.5 high-emission scenario (Meinshausen et al., 2011) is chosen for all the future simulations in order to increase the signal-to-noise ratio and highlight projected changes in heavy precipitation despite a background of strong natural variability. Thirteen simulations are available for the mid-century period (all except WRF-FZJ-IDL), as well as for the end-century period (all except REMO-GERICS).

The FPS protocol sets a CP-RCM resolution range, common domain and periods but each institute made its own choice for the simulation setup and the driving RCM and GCM according to their needs and constraints. Most of the simulations are based on a two-tier modelling chain (cf. Figure S1) with CP-RCMs driven by GCM projections (typically at 150km resolution) with an intermediate RCM step (12-15km resolution) to limit the resolution jump.

Further details and references can be found in Table S1 and Figure S2.

2.2 Mediterranean HPEs detection and tracking

To identify and characterize the northwestern Mediterranean heavy precipitating systems in the CP-RCM simulations, we apply a specific detection and tracking algorithm (Morel & Senesi, 2002; Caillaud et al., 2021) onto successive 1-hour accumulated precipitation fields. This method (summarised in Text S1) has already been used for high-frequency precipitation evaluation in single-model (Caillaud et al., 2021) and multi-model (Müller et al., 2022) studies.

To select French Mediterranean HPEs following Caillaud et al. (2021), a spatial criteria is applied: only the tracks crossing the French Mediterranean area (cf. Figure S1) are taken into account. Moreover, in addition to the 10mm/h intensity threshold set in order to select convective heavy precipitation, only tracks occurring during 24-hour sliding windows with accumulated precipitation exceeding the 100mm threshold at least over one grid point of the French Mediterranean area are selected. One Mediterranean HPE can thus correspond to a combination of several convective systems (Duffourg et al., 2016), and therefore to several tracks.

All CP-RCMs simulations are firstly interpolated using conservative remapping to the common regular 3km resolution ALP-3i grid. Then, the tracking algorithm and Mediterranean HPE detection are applied. In order to evaluate the historical simulations, the

35 same methodology is applied to the available kilometric and hourly observations (COMEPHORE
36 over France and GRIPHO over Italy).

37 The focus is on an extended fall season (from September to December), when most
38 of the HPEs occur in the northwestern Mediterranean region (Ricard et al., 2012). The
39 changes of seasonality of Mediterranean HPEs (studied in Chan et al. (2020)) are not
40 part of this study.

31 **3 Results**

32 **3.1 Evaluation of the historical simulations**

33 The preliminary step before studying future changes is to check the ability of the
34 14 CP-RCMs historical simulations to reproduce the main characteristics of fall north-
35 western Mediterranean HPEs, with a focus on the French Mediterranean area with re-
36 liable observations. The detailed evaluation can be found in Text S2.

37 The main results are the following:

- 38 • good spatial representation of the areas known to be affected by fall HPEs in terms
39 of number and positioning, even if there are differences among simulations that
40 cannot be explained by the CP-RCM family or the driving GCM;
- 41 • overestimated numbers of HPEs over mountainous regions and Italy that can partly
42 arise from a possible observational rainfall deficit;
- 43 • lower numbers of HPEs in the Cevennes foothills with respect to the observations,
44 though to a lesser extent with the AROME simulations. The limitations of CP-
45 RCM in capturing mesoscale convection, such as cold pools (Hirt et al., 2020), may
46 be responsible for this underestimation, which was also found in Müller et al. (2022);
- 47 • in the French Mediterranean area, overall good representation of the main char-
48 acteristics of fall HPEs in terms of intensity, area, volume and severity as defined
49 in Text S1. Duration and propagation speed are overestimated by almost all the
50 simulations. For AROME and RegCM simulations and even more for REMO, a
51 significant overestimation of rain volumes is found, related to long-lasting and over-
52 sized systems. RegCM-ICTP simulates too high maximum intensities (Stocchi et
53 al., 2022), whereas AROME-CNRM underestimates them (Caillaud et al., 2021).

54 Therefore, this evaluation allows us to conclude that all our historical timeslice sim-
55 ulations reasonably represent the main present-day characteristics of Mediterranean HPEs,
56 so that it was decided to keep all available GCM/CP-RCM combinations to study their
57 response in a warmer climate.

58 **3.2 Future changes under RCP8.5 scenario**

59 We present here the results for the last decade of the 21st century using an ense-
60 mble of 13 CP-RCM simulations. The focus is here mostly on the ensemble-mean response
61 and on the qualitative multi-model agreement (i.e., the number of models that agree about
62 the sign of the anomalies and the statistical significance of sign change at the 90% con-
63 fidence level using a bootstrapping method described in Text S1). The results of indi-
64 vidual models are presented in the Supporting Information (Figures S11-S16).

65 **3.2.1 Changes in frequency over the pan Alpine domain**

66 Figure 1 presents the ensemble-mean spatial density of precipitating systems above
67 10mm/h and focuses on the fall season over (a) the historical period, (b) the end-century
68 period and (c) the differences between the two periods. An increased frequency is sim-
69 ulated in the major part of the pan-Alpine domain and most strongly in its eastern part,

30 from central Italy to the northern Balkans. If the multi-model ensemble mean does not
 31 show any negative anomaly, no change is expected in the south-west and north-east parts
 32 of the domain. Moreover, the 10-cell contour isoline of the historical simulation, well rep-
 33 representative of the present-day areas known to be affected by Mediterranean HPEs, was
 34 superimposed on the projected anomalies and thus highlights a substantial extension of
 35 the affected areas. At the end of 21st century, the pre-Alps, the interior of Italy, Slove-
 36 nia or Croatia, the south of Austria or Switzerland may be affected by intense convec-
 37 tive systems during the fall, whereas they are hardly impacted nowadays. The land area
 38 with densities above 10 cells per year is expected to almost double by the end of the cen-
 39 tury, from 214002 km² to 411867 km², i.e. +92%.

40 Figure 1 (d) highlights the good agreement among the different simulations. About
 41 95%, 83% and 71% of the land domain exhibit a model agreement above 67%, 80% and
 42 90% respectively. However, there is no clear model agreement over the Southeast of France,
 43 the Northwest of Italy and a large portion of the Mediterranean sea. Looking at indi-
 44 vidual model changes (cf. Figure S11), the large increase in the frequency of heavy pre-
 45 cipitation is also found over central Italy to the northern Balkans for all simulations. If
 46 we classify the simulations according to the driving GCM, we find some common behaviours:
 47 for example, the three simulations driven by EC-Earth r12 present lower changes, with
 48 differences of annual number of cells above 10mm/h over land between +1.7 and +1.9
 49 to be compared to the +3.4 of the ensemble mean. In contrast, no common behaviour
 50 can be easily identified among the CP-RCM families. Such results highlight a dominant
 51 influence of the driving GCM for predicting changes in the number of HPEs, pointing
 52 the dominant role of the change in large scale dynamics and natural variability in set-
 53 ting the frequency change of the Mediterranean HPEs.

54 The lack of consensus on frequency changes over parts of the ALP-3 domain leads
 55 us to investigate whether consensus can be found for the other characteristics of Mediter-
 56 ranean HPEs. The French Mediterranean area, where a reliable evaluation of the sim-
 57 ulations has been carried out, provides an appropriate study area.

58 **3.2.2 Focus on the French Mediterranean**

59 Figure 2 (a) shows the multi-model ensemble changes of French Mediterranean HPEs'
 60 characteristics projected at the end of the century and spatially averaged over the area.
 61 For the change in the number of tracks ("Number"), the lack of consensus is confirmed:
 62 the ensemble-mean increase in the number of tracks (+19%) hides indeed a large range
 63 of anomalies across the individual simulations between -12% and +125%. Moreover, a
 64 majority of simulations shows a limited and no significant sign change (between -12%
 65 and +8%). Three simulations anticipate larger and significant increases of which the two
 66 driven by HadGEM2-ES and the UM-UKMO simulation driven by HadGEM3-GC with
 67 an outstanding increase of +125%. These changes can be linked with the changes in the
 68 number of days exceeding 100mm/d ("Nb100"), a proxy of the number of days with favourable
 69 large-scale conditions for HPEs. This highlights again a dominant influence of the driv-
 70 ing GCM for predicting changes in the number of HPEs.

71 A full model agreement, which is also highly statistically significant, is found for
 72 an increase in mean and maximum precipitation intensities, ranging from +0 to +11%
 73 and from +3 to +20%, respectively. For changes in mean and maximum area, there is
 74 more inter-model spread in the magnitude, but a good agreement (12/13 simulations)
 75 for an increase (ranging from -23 to +28% and from -24 to +20% respectively). In line
 76 with the projected increase in intensities and areas, 12 out of 13 simulations show an in-
 77 crease in volume and severity (with a large range of values among simulations, from -
 78 9 to +87% and from -2 to +56%, respectively). A good model agreement is also found
 79 for little and no significant change in duration and in propagation speed. Future increases
 80 in areas are also found in Müller et al. (2023) for all-year Mediterranean HPEs, in Purr

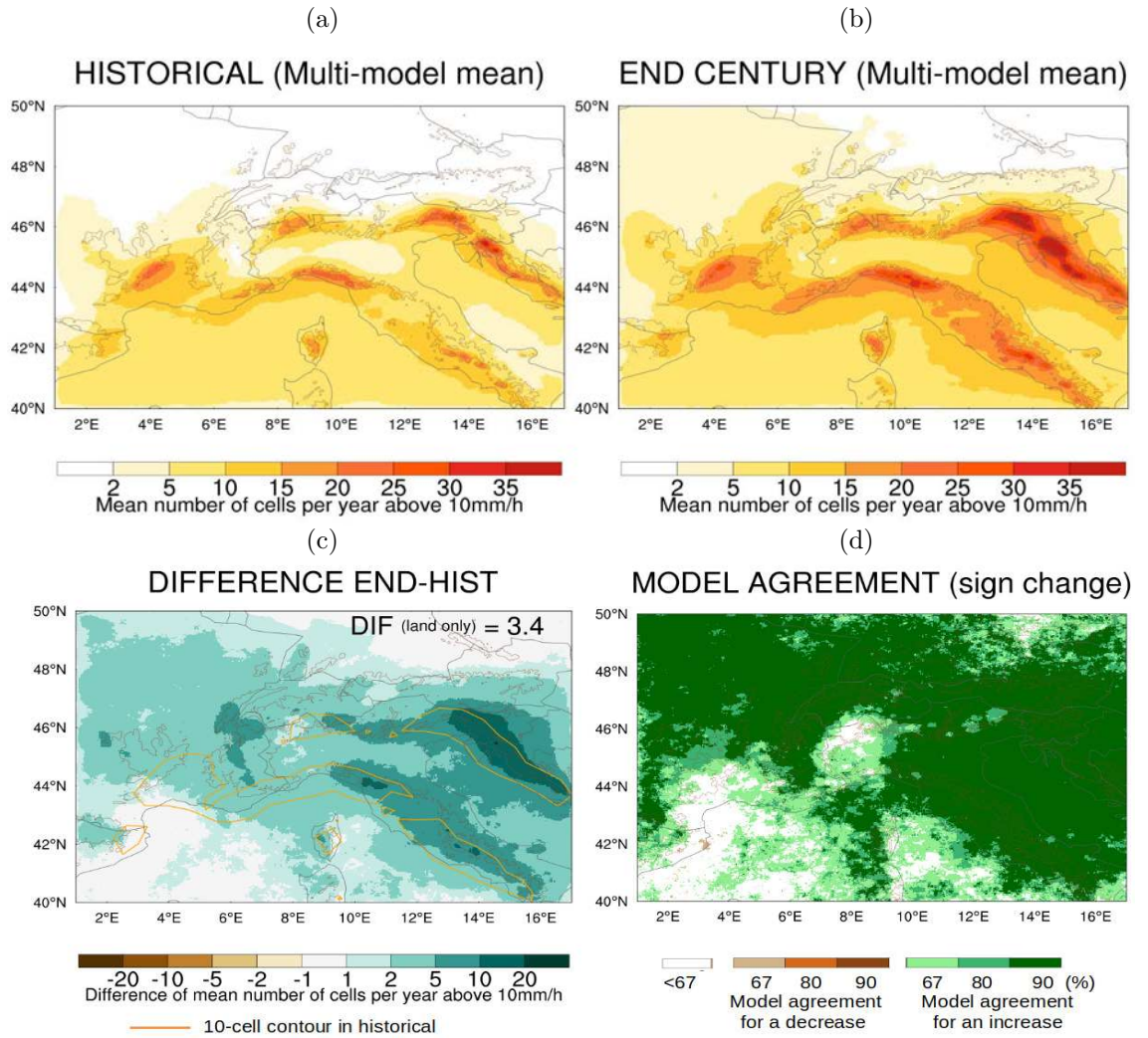


Figure 1. Spatial density of cells above 10mm/h during SOND for the multi-model mean for the historical (a) and the end-century (b) periods. Raw differences (c) with difference of number of cells per year over land indicated at the top right and in orange, the 10-cell contour isolines for the historical period. Model agreement (d) for the sign changes in %. On all figures, orography (750 m) plotted in brown lines.

et al. (2021) for convective cells over Germany and in Prein et al. (2017) for intense summertime MCSs over North-America.

Yet, the UM-UKMO behaves differently for most characteristics: in addition to the highest number of tracks, the simulation shows a larger decrease in duration and is the only one to propose a decrease in areas (around -25%). On the other hand, it presents the highest increase in mean and maximum intensity (+11% and +20% respectively). These contrasting and significant changes explain non-significant changes in volume and severity. This simulation thus projects different changes in convection over the French Mediterranean, in line with the changes in European storms found by Chan et al. (2023) comparing the same UM-UKMO simulation to a CCLM-ETHZ simulation over a pan-European domain, with the latter using a pseudo-global warming approach: more frequent, smaller storms with UM-UKMO contrast with fewer, larger ones with CCLM-ETHZ. In this case, differences in changes in the large scale dynamics are identified as being responsible for the differences in changes in storm characteristics.

In order to combine different tracks characteristics, we also present IDH plots (maximum Intensity Duration Histogram, cf. Figures 2 b,c,d) and IAH plots (maximum Intensity maximum Area Histogram, cf. Figures 2 e,f,g) which present the distribution of tracks' frequency defined as the combined occurrence of maximum intensity and duration or area values in chosen bins, normalised by the total number of tracks. The IDH and IAH plots for the multi-model frequency ensemble mean confirm the increase of intensity expected at the end of the century for HPEs. For intensities below 30mm/h, the frequency of short and small events increases. Above 30mm/h, an increase of the frequencies of heavy precipitating systems whatever the duration and the area is expected. The individual changes in IDH distributions (cf. Figure S12) are rather patchy. For the simulations driven by MPI-ESM-LR or EC-Earth r14, it is difficult to find a clear signal. For the others, the pattern is close to the multi-model mean's one, in particular those driven by HadGEM2-ES and for the UM-UKMO simulation, which shows the clearest increase in frequency of short duration events. The panel for IAH changes (cf. Figure S13) displays a little more dispersion, but still with a clearer signal of increased frequency of small-sized events for UM-UKMO.

Understanding these differences deserves further investigation which is however beyond the scope of the present study. Multiple differences in the model set-up may contribute to such differences and suggest the need for even more coordinated and comprehensive intercomparisons or additional sensitivity tests to allow a better interpretation of the results.

The full agreement for an increase in intensity of the future fall French Mediterranean convective systems is however noteworthy when compared to other past studies such as Trambly and Somot (2018) on French Mediterranean catchment basins at daily scale, but the values are relatively low, ranging from +3 to +20%. Normalizing these values by the corresponding fall (SOND) changes in mean 2m temperature averaged over the whole ALP-3 domain (see Table S2) leads to a range from +1 to +5%/°C, below the expected +7%/°C CC rate (Vergara-Temprado et al., 2021) and therefore well below the super-CC rate that has been reported for extreme hourly precipitation in previous studies (Lenderink et al., 2011, 2017, 2019; Kendon et al., 2014). Although our study is not aligned with these previous studies, a stronger intensification could be found for the most extreme precipitation events (Purr et al., 2021), which leads us to look at the tail distribution of the events.

Therefore, we focus now on the most intense tracks, i.e. those with maximum intensities above each simulation's historical 97th percentile of maximum intensities. This fixed value is chosen to be consistent in the observations with the thresholds used in the operational weather warning system of Météo-France for heavy precipitation in south-eastern France, but also to have a sufficient number of convective systems.

33 Changes in the main characteristics of the most intense tracks (cf. Figure S14) show
 34 now a full model agreement for a strong increase in frequency, ranging from +38% to
 35 +326%, still large model agreement for the increase in intensity but larger spread for changes
 36 in spatial extent, and hence volume and severity of HPEs. The individual distributions
 37 of the maximum intensities (cf. Figure S15) illustrate the difference of behaviour among
 38 simulations. Most of the historical simulations underestimate the observed highest val-
 39 ues but reach very different maximum values. The differences are even larger for end-
 40 century simulations, with, for example, much higher values for UM-UKMO or WRF-IPSL.
 41 RegCM-ICTP behaves differently with very high values, some of them exceeding 300m/h,
 42 in both historical and end-century simulations.

43 Despite the limited length of the simulations, our tracking methodology allows to
 44 identify a large number of tracks (at least 155/year) and therefore to use a Generalized
 45 Pareto Distribution (GPD, presented in Text S1) for modelling the tails of the distri-
 46 bution of the tracks' maximum intensities. In particular, this method allows us to in-
 47 fer intensity changes of events with return periods exceeding 10 years. Individual return
 48 period plots are presented in Figure S16. Figure 2 (h) focuses on the 20-year return val-
 49 ues and mean relative changes between historical and end-century periods for each simu-
 50 lation, except RegCM-ICTP which is the only one to project a decrease associated with
 51 much higher values and very large confidence intervals (see table S2 for details). Most
 52 historical simulations show lower than observed values. For the end-century period, in-
 53 creases in 20-year return values are higher than when looking at changes in intensity for
 54 all tracks, still with a large range among simulations, from +16 to +95%. Based on the
 55 value calculated from observations, this range of increase would correspond to 20-year
 56 return values between 142 and 239mm/h at the end of the century. These very high val-
 57 ues must be set against the record values already measured: world record of 305mm/h
 58 (June 1947, Missouri, USA), southeastern France record of 160mm/h (October 1986, Pyrénées-
 59 Orientales). When compared to the average temperature increase (see Table S2), we also
 60 find very large differences, with values (+4 to +27%/°C) ranging from below the CC rate
 61 up to 4 times the CC rate. Again, it is not possible to find common behaviour within
 62 CP-RCM family or according to the driving GCM. For instance, two CP-RCMs of the
 63 same family driven by the same GCM show the smallest and largest increase respectively.
 64 Likewise, there is no direct relationship between the increase in intensity for 20-year re-
 65 turn periods and the increase in frequency and neither when comparing to the increase
 66 in regional near-surface temperature, highlighting that the HPE future evolution can de-
 67 viate substantially from the assessed global picture of an increase at the CC rate (Seneviratne
 68 et al., 2021).

69 For the mid-century period (see Text S3 for details), the conclusions are close to
 70 those given for the end-of-century period; although with lower values and less statisti-
 71 cal significance for the changes of the main characteristics, and a stronger impact of the
 72 climate natural variability on the frequency change.

73 4 Conclusions

74 Taking advantage of the unprecedented large ensemble of Convection Permitting-
 75 Regional Climate Models (CP-RCMs) deployed in the CORDEX Flagship Pilot Study
 76 (FPS) on Convection on a common pan-Alpine domain and combining it with an object-
 77 oriented approach, this study aims to investigate the future changes in fall Mediterranean
 78 Heavy Precipitation Events (HPEs) at high warming levels. A convective-cell detection
 79 and tracking algorithm is applied to 1-h accumulated precipitation fields of fourteen CP-
 80 RCM simulations: the 10-year historical simulations are first evaluated with regards to
 81 the observations, then compared to mid-century and end-century timeslices to assess fu-
 82 ture changes. This Lagrangian approach is used to analyze both the frequency and the
 83 intrinsic characteristics of either all or the most extreme convective systems. The multi-

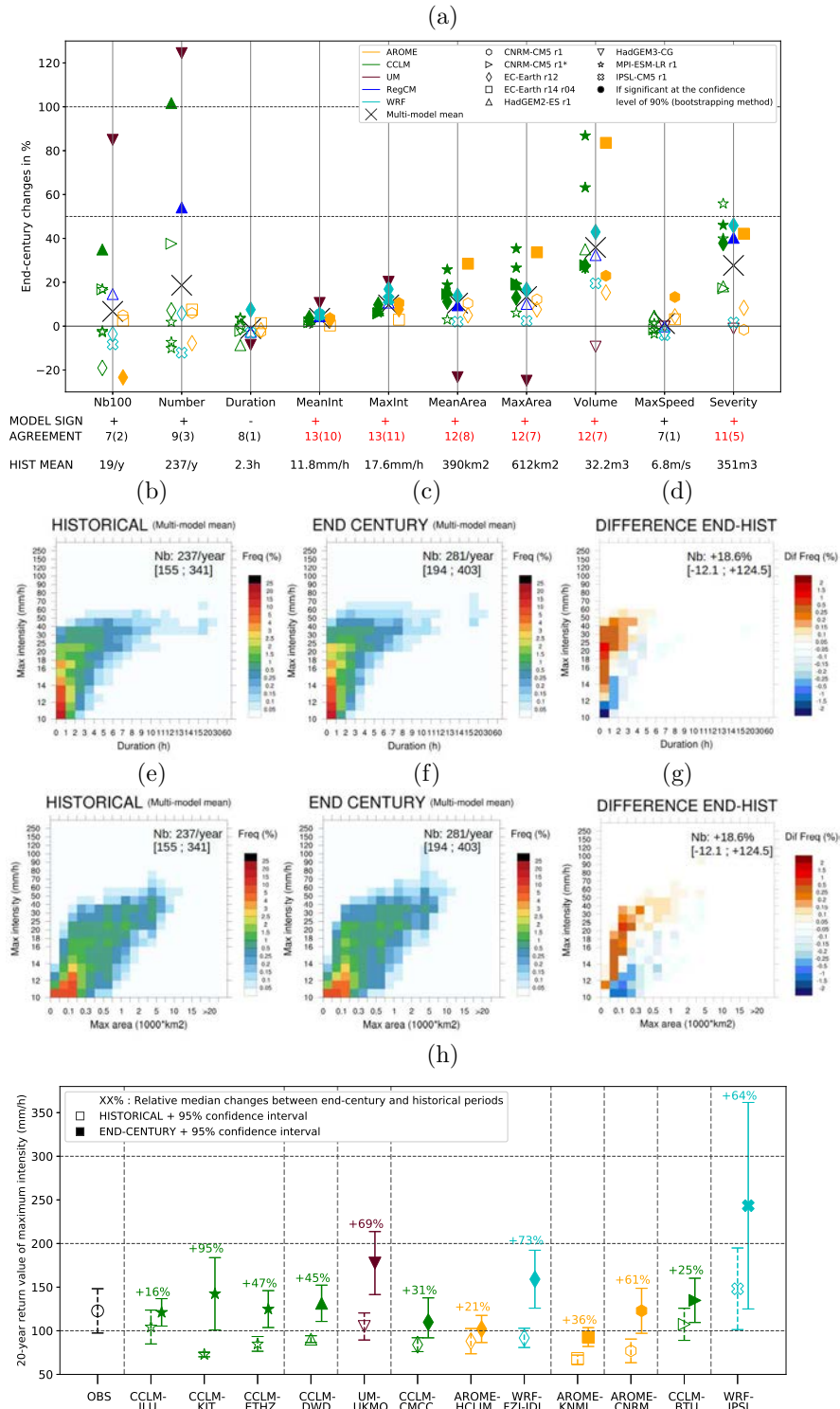


Figure 2. For the selection of tracks over the French Mediterranean area during SOND: main characteristics' differences (a) between the end-century and the historical periods for the multi-model mean and the 13 CP-RCMs (one colour per family of CP-RCM and one symbol per driving GCM). Model agreement on the sign change in colour if higher than 80%, otherwise in black and the number of simulations with significant sign changes in brackets. Multi-model mean for IDH and IAH plots for the historical (b,e) and the end-century (c,f) periods, and the differences (d,g). Individual values of maximum intensity (h) for 20-year return periods given by a GPD fit for the most intense tracks (except RegCM) with the same colours and symbols as (a).

34 model approach allows us to quantify model uncertainties, assess the qualitative agree-
 35 ment among the available simulations, and thus identify the most robust changes.

36 The following robust results were identified:

- 37 • All CP-RCM historical simulations reasonably represent the main present-day char-
 38 acteristics of Mediterranean HPEs.
- 39 • At high warming levels, an increased frequency is simulated in the greater part
 40 of the pan-Alpine domain and most strongly in its eastern part where there is full
 41 agreement among simulations. This increase in frequency is combined with a sub-
 42 stantial extension, i.e. a doubling of the affected areas.
- 43 • The study highlights a dominant influence of the driving GCM for projecting changes
 44 in the frequency of HPEs. Hence, the choice of the driving GCM is essential and
 45 should be done through studies on GCM simulations focusing on favourable weather
 46 regimes such as Nuissier et al. (2011) or Brigode et al. (2018) using a storyline per-
 47 spective (Zappa & Shepherd, 2017; Shepherd, 2019).
- 48 • Over the French Mediterranean, a full model agreement is found for an increase
 49 in mean and maximum intensities (ranging from +0 to +11% and from +3 to +20%
 50 respectively) for all tracks. Large agreement is also outlined for an increase in mean
 51 and maximum areas and therefore in volume and severity. A relatively good agree-
 52 ment is also found for little change in duration and propagation speed.

53 However, large quantitative uncertainties persist despite the use of CP-RCMs:

- 54 • Even with high-resolution modelling and explicitly resolved deep convection, sig-
 55 nificant biases in present-day precipitation extremes still remain, as also highlighted
 56 in the DYAMOND global CPM simulations (Feng et al., 2023).
- 57 • No clear model agreement is found in frequency changes over part of the pan-Alpine
 58 domain including southeastern France, probably linked to differences in large-scale
 59 synoptic conditions imposed by the driving GCMs.
- 60 • A large range of plausible changes in HPE properties is simulated across the en-
 61 semble of GCM/CP-RCM combinations, including for the scaling of increased in-
 62 tensity with the corresponding regional warming.
- 63 • One simulation, with a distinctive set-up, projects different, yet plausible, changes
 64 in convection with more intermittent but more intense convective systems with
 65 shorter lifetime and smaller size.
- 66 • Regarding the most intense HPEs over the French Mediterranean, the large range
 67 of projected changes in frequency and in 20-year return maximum intensity val-
 68 ues (up to +95%) cannot be easily related to the choice of the CP-RCM or driv-
 69 ing GCM, or to the projected regional warming.

70 Various limitations of the present study provide some lessons for future studies:

- 71 • 10-year simulations are not long enough to assess accurately changes in extremes
 72 such as Mediterranean HPEs which show a high interannual variability, as con-
 73 firmed by the mid-century study. Similarly, simulations over larger domains would
 74 allow CP-RCMs to express their own internal variability and their intrinsic sen-
 75 sitivity, potentially leading to a different signal to noise ratio.
- 76 • 2 to 3-km convection-permitting models allow us to switch off the parametriza-
 77 tion of deep convection, but still need some parametrization such as turbulence
 78 or micro-physical processes, which may also contribute to model uncertainties and
 79 also need specific assessments. Therefore, increasing model resolution will not nec-
 80 essarily lead to a reduction of uncertainty and should not lead to decreasing model
 81 diversity and/or the size of multi-model ensembles.

- Although the CORDEX FPS on Convection has made possible this first CP-RCM intercomparison, it remains an ensemble of opportunity with limited coordination regarding the driving method and GCM strategy. Larger and better designed ensembles are thus needed, possibly combined with a new hybrid downscaling technique such as a RCM emulator (Doury et al., 2022).
- Additional impact variables (hail, wind gusts) or process-oriented diagnostics (composites of environmental variables such as the vertical profile of temperature and humidity) are needed to better document and understand future changes in Mediterranean HPEs.

Our final message is thus that efforts to provide policy-relevant climate information regarding future changes in precipitation extremes using ensembles of high-resolution regional models should be continued and will need enhanced coordination, at least at the European level as a follow-up to the CORDEX FPS on Convection.

Open research

Data Availability Statement

The hourly precipitation data of the CORDEX-FPS on Convection CP-RCMs ensemble are or will soon become available on the ESGF archive. COMEPHORE dataset is available through AERIS platform (<https://radarsmf.aeris-data.fr/en/home-page/>). The archiving of the tracking data over the whole ALP-3 domain and the selection of tracks over the French Mediterranean for all simulations (historical, mid-century and end-century periods) and observation is available on Zenodo (Caillaud, 2023). Codes for data visualization are based on the NCL language (NCAR, 2019) and the Python library (Hunter, 2007).

Acknowledgments

We acknowledge WCRP-CORDEX-FPS on Convective phenomena at high resolution over Europe and the Mediterranean (FPSCONV-ALP-3). This work was funded by European Union through Horizon-2020 EUCP (Grant Agreement No.776613) and HORIZON-EUROPE IMPETUS4CHANGE projects and by ANR-France-2030 as part of PEPR TRACCS programme (ANR-22-EXTR-0011). We thank the research data exchange infrastructure and services provided by Jülich Supercomputing Centre, Germany, as part of Helmholtz Data Federation initiative, CETEMPS, University of L'Aquila, for allowing ICTP to access the Italian database of precipitation which GRIPHO is based on, AERIS for providing COMEPHORE dataset and Aurelien Ribes for his statistical advice. HdV thanks Bert van Ulft, Erik van Meijgaard for KNMI simulations. KGo acknowledges the computing time on supercomputer JURECA at Forschungszentrum Jülich (grant no. CJJSC39). MED acknowledges partnership for advanced computing in Europe for awarding her access to Piz Daint at the Swiss National Supercomputing Centre, as well as the Federal Office for Meteorology and Climatology, Center for Climate Systems Modeling and ETH Zurich for their contributions to COSMO-crCLIM development. IPSL's work was granted access to HPC resources of TGCC under allocations 2019-A0030106877 and 2020-A0030106877 made by GENCI, and to IPSL's ESPRI computing/storage resources.

References

- Aidinolfi, M., Raffa, M., Reder, A., & Mercogliano, P. (2021). Evaluation and expected changes of summer precipitation at convection permitting scale with COSMO-CLM over alpine space. *Atmosphere*, 12(1), 54. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/atmos12010054>
- Baldauf, M., Seifert, A., Förstner, J., Majewski, D., Raschendorfer, M., & Reinhardt, T. (2011). Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: Description and sensitivities. *Monthly Weather Review*, 139(12), 3887–3905. Retrieved from <https://doi.org/10.1175/178>

MWR-D-10-05013.1

- Ban, N., Caillaud, C., Coppola, E., Pichelli, E., Sobolowski, S., Adinolfi, M., ... others (2021). The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution, part I: Evaluation of precipitation. *Climate Dynamics*. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05708-w>
- Belušić, D., de Vries, H., Dobler, A., Landgren, O., Lind, P., Lindstedt, D., ... others (2020). HCLIM38: A flexible regional climate model applicable for different climate zones from coarse to convection permitting scales. *Geosci. Model Dev.* Retrieved from <https://doi.org/10.5194/gmd-13-1311-2020>
- Berthou, S., Kendon, E. J., Chan, S. C., Ban, N., Leutwyler, D., Schär, C., & Fossier, G. (2020). Pan-european climate at convection-permitting scale: a model intercomparison study. *Climate Dynamics*, 55, 35–59. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4114-6>
- Blanchet, J., & Creutin, J.-D. (2022). Instrumental agreement and retrospective analysis of trends in precipitation extremes in the French Mediterranean Region. *Environmental Research Letters*, 17(7), 074011. Retrieved from <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac7734>
- Blanchet, J., Molinié, G., & Touati, J. (2018). Spatial analysis of trend in extreme daily rainfall in southern France. *Climate dynamics*, 51(3), 799–812. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3122-7>
- Brigode, P., Gérardin, M., Bernardara, P., Gailhard, J., & Ribstein, P. (2018). Changes in French weather pattern seasonal frequencies projected by a CMIP5 ensemble. *International Journal of Climatology*, 38(10), 3991–4006. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/joc.5549>
- Brisson, E., Brendel, C., Herzog, S., & Ahrens, B. (2018). Lagrangian evaluation of convective shower characteristics in a convection-permitting model. *Meteorologische Zeitschrift*, 59–66. Retrieved from <https://doi.org/10.1127/metz/2017/0817>
- Brousseau, P., Seity, Y., Ricard, D., & Léger, J. (2016). Improvement of the forecast of convective activity from the AROME-France system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(699), 2231–2243. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/qj.2822>
- Caillaud, C. (2023). Mediterranean Heavy Precipitation Events in a warmer climate : robust versus uncertain changes with a large convection-permitting model ensemble : supporting information (Version v20240112) [Dataset]. Zenodo. Retrieved from <https://doi.org/10.5281/zenodo.8124196>
- Caillaud, C., Somot, S., Alias, A., Bernard-Bouissières, I., Fumière, Q., Laurantin, O., ... Ducrocq, V. (2021). Modelling mediterranean heavy precipitation events at climate scale: an object-oriented evaluation of the CNRM-AROME convection-permitting regional climate model. *Climate Dynamics*, 1–36. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05558-y>
- Chan, S. C., Kendon, E. J., Berthou, S., Fossier, G., Lewis, E., & Fowler, H. J. (2020). Europe-wide precipitation projections at convection permitting scale with the Unified Model. *Climate Dynamics*, 55, 409–428. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05192-8>
- Chan, S. C., Kendon, E. J., Fowler, H. J., Kahraman, A., Crook, J., Ban, N., & Prein, A. F. (2023). Large-scale dynamics moderate impact-relevant changes to organised convective storms. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 8. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00669-2>
- Coles, S., Bawa, J., Trenner, L., & Dorazio, P. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values* (Vol. 208). Springer. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3675-0>
- Coppola, E., Nogherotto, R., Ciarlo, J. M., Giorgi, F., van Meijgaard, E., Kadyrov, N., ... others (2021). Assessment of the European Climate Projections as Simulated by the Large EURO-CORDEX Regional and Global Climate Model

- 37 Ensemble. *JGR Atmospheres*. Retrieved from [https://doi.org/10.1029/](https://doi.org/10.1029/2019JD032344)
 38 2019JD032344
- 39 Coppola, E., Sobolowski, S., Pichelli, E., Raffaele, F., Ahrens, B., Anders, I., ...
 40 others (2020). A first-of-its-kind multi-model convection permitting ensemble
 41 for investigating convective phenomena over Europe and the Mediterranean.
 42 *Climate Dynamics*, 55, 3–34. Retrieved from [https://doi.org/10.1007/](https://doi.org/10.1007/s00382-018-4521-8)
 43 s00382-018-4521-8
- 44 de Vries, H., Lenderink, G., van der Wiel, K., & van Meijgaard, E. (2022). Quan-
 45 tifying the role of the large-scale circulation on European summer precipi-
 46 tation change. *Climate Dynamics*, 59(9-10), 2871–2886. Retrieved from
 47 <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06250-z>
- 48 Doury, A., Somot, S., Gadat, S., Ribes, A., & Corre, L. (2022). Regional climate
 49 model emulator based on deep learning: concept and first evaluation of a novel
 50 hybrid downscaling approach. *Climate Dynamics*, 1–29. Retrieved from
 51 <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06343-9>
- 52 Ducrocq, V., Nuissier, O., Ricard, D., Lebeaupin, C., & Thouvenin, T. (2008).
 53 A numerical study of three catastrophic precipitating events over southern
 54 France. II: Mesoscale triggering and stationarity factors. *Quarterly Jour-*
 55 *nal of the Royal Meteorological Society*, 134(630), 131–145. Retrieved from
 56 <https://doi.org/10.1002/qj.199>
- 57 Duffourg, F., Nuissier, O., Ducrocq, V., Flamant, C., Chazette, P., Delanoë, J.,
 58 ... others (2016). Offshore deep convection initiation and maintenance
 59 during the HyMeX IOP 16a heavy precipitation event. *Quarterly Jour-*
 60 *nal of the Royal Meteorological Society*, 142(S1), 259–274. Retrieved from
 61 <https://doi.org/10.1002/qj.2725>
- 62 Dufresne, J.-L., Foujols, M.-A., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., ...
 63 others (2013). Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System
 64 Model: from CMIP3 to CMIP5. *Climate dynamics*, 40, 2123–2165. Retrieved
 65 from <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1>
- 66 Fantini, A. (2019). *Climate change impact on flood hazard over Italy*. (Un-
 67 published doctoral dissertation). Università degli Studi di Trieste - URL
 68 <http://hdl.handle.net/11368/2940009>.
- 69 Feng, Z., Leung, L. R., Hardin, J., Terai, C. R., Song, F., & Caldwell, P. (2023).
 70 Mesoscale Convective Systems in DYAMOND Global Convection-Permitting
 71 Simulations. *Geophysical Research Letters*, 50(4), e2022GL102603. Retrieved
 72 from <https://doi.org/10.1029/2022GL102603>
- 73 Fumière, Q., Déqué, M., Nuissier, O., Somot, S., Alias, A., Caillaud, C., ... Seity,
 74 Y. (2020). Extreme rainfall in Mediterranean France during the fall: added
 75 value of the CNRM-AROME Convection-Permitting Regional Climate Model.
 76 *Climate Dynamics*, 55, 77–91. Retrieved from [https://doi.org/10.1007/](https://doi.org/10.1007/s00382-019-04898-8)
 77 s00382-019-04898-8
- 78 Fumière, Q. (2019). *Changement climatique et précipitations extrêmes : apport des*
 79 *modèles résolvant la convection*. (Unpublished doctoral dissertation). Univer-
 80 sité Paul Sabatier, Toulouse III. <http://thesesups.ups-tlse.fr/4564/>.
- 81 Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., Sylla, M., Bi, X., ... others
 82 (2012). RegCM4: model description and preliminary tests over multi-
 83 ple CORDEX domains. *Climate Research*, 52, 7–29. Retrieved from
 84 <https://doi.org/10.3354/cr01018>
- 85 Hazeleger, W., Wang, X., Severijns, C., Ștefănescu, S., Bintanja, R., Sterl, A., ...
 86 others (2012). EC-Earth V2. 2: description and validation of a new seamless
 87 earth system prediction model. *Climate dynamics*, 39, 2611–2629. Retrieved
 88 from <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1228-5>
- 89 Hirt, M., Craig, G. C., Schäfer, S. A., Savre, J., & Heinze, R. (2020). Cold-
 90 pool-driven convective initiation: Using causal graph analysis to deter-
 91 mine what convection-permitting models are missing. *Quarterly Journal*

- of the *Royal Meteorological Society*, 146(730), 2205–2227. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/qj.3788>
- Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment [Software]. *Computing in Science & Engineering, IEEE COMPUTER SOC*, 9(3), 90–95. Retrieved from <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- Jacob, D., Elizalde, A., Haensler, A., Hagemann, S., Kumar, P., Podzun, R., ... others (2012). Assessing the transferability of the regional climate model REMO to different coordinated regional climate downscaling experiment (CORDEX) regions. *Atmosphere*, 3(1), 181–199. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/atmos3010181>
- John, A., Douville, H., Ribes, A., & Yiou, P. (2022). Quantifying CMIP6 model uncertainties in extreme precipitation projections. *Weather and Climate Extremes*, 36, 100435. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100435>
- Jones, C., Hughes, J., Bellouin, N., Hardiman, S., Jones, G., Knight, J., ... others (2011). The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geoscientific Model Development*, 4(3), 543–570. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/gmd-4-543-2011>
- Kahraman, A., Kendon, E. J., Chan, S. C., & Fowler, H. J. (2021). Quasi-stationary intense rainstorms spread across Europe under Climate Change. *Geophysical Research Letters*, 48(13), e2020GL092361. Retrieved from <https://doi.org/10.1029/2020GL092361>
- Kendon, E. J., Prein, A. F., Senior, C., & Stirling, A. (2021). Challenges and outlook for convection-permitting climate modelling. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 379(2195), 20190547. Retrieved from <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0547>
- Kendon, E. J., Roberts, N. M., Fowler, H. J., Roberts, M. J., Chan, S. C., & Senior, C. A. (2014). Heavier summer downpours with climate change revealed by weather forecast resolution model. *Nature Climate Change*, 4(7), 570–576. doi: 10.1038/nclimate2258
- Keuler, K., Radtke, K., Kotlarski, S., & Lüthi, D. (2016). Regional climate change over Europe in COSMO-CLM: Influence of emission scenario and driving global model. *Meteorologische Zeitschrift*, 25(2), 121–136. Retrieved from <https://doi.org/10.1127/metz/2016/0662>
- Khodayar, S., Davolio, S., Di Girolamo, P., Lebeaupin Brossier, C., Flaounas, E., Fourrie, N., ... others (2021). Overview towards improved understanding of the mechanisms leading to heavy precipitation in the western Mediterranean: lessons learned from HyMeX. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(22), 17051–17078. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/acp-21-17051-2021>
- Lenderink, G., Barbero, R., Loriaux, J., & Fowler, H. (2017). Super-Clausius-Clapeyron scaling of extreme hourly convective precipitation and its relation to large-scale atmospheric conditions. *Journal of Climate*, 30(15), 6037–6052. Retrieved from <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0808.1>
- Lenderink, G., Belušić, D., Fowler, H. J., Kjellström, E., Lind, P., van Meijgaard, E., ... de Vries, H. (2019). Systematic increases in the thermodynamic response of hourly precipitation extremes in an idealized warming experiment with a convection-permitting climate model. *Environmental Research Letters*, 14(7), 074012. doi: 10.1088/1748-9326/ab214a
- Lenderink, G., Mok, H., Lee, T., & Van Oldenborgh, G. (2011). Scaling and trends of hourly precipitation extremes in two different climate zones—Hong Kong and the Netherlands. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(9), 3033–3041. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/hess-15-3033-2011>
- Leutwyler, D., Lüthi, D., Ban, N., Fuhrer, O., & Schär, C. (2017). Evaluation of the convection-resolving climate modeling approach on continental scales.

- 47 *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(10), 5237–5258. doi:
 48 10.1002/2016JD026013
- 49 Li, L., Li, Y., & Li, Z. (2020). Object-based tracking of precipitation systems
 50 in western Canada: the importance of temporal resolution of source data.
 51 *Climate Dynamics*, 1–17. Retrieved from [https://doi.org/10.1007/](https://doi.org/10.1007/s00382-020-05388-y)
 52 [s00382-020-05388-y](https://doi.org/10.1007/s00382-020-05388-y)
- 53 Lucas-Picher, P., Argüeso, D., Brisson, E., Trambly, Y., Berg, P., Lemonsu,
 54 A., . . . Caillaud, C. (2021). Convection-permitting modeling with re-
 55 gional climate models: Latest developments and next steps. *Wiley In-*
 56 *terdisciplinary Reviews: Climate Change*, 12(6), e731. Retrieved from
 57 <https://doi.org/10.1002/wcc.731>
- 58 Marsland, S. J., Haak, H., Jungclaus, J. H., Latif, M., & Röske, F. (2003).
 59 The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal
 60 curvilinear coordinates. *Ocean modelling*, 5(2), 91–127. Retrieved from
 61 [https://doi.org/10.1016/S1463-5003\(02\)00015-X](https://doi.org/10.1016/S1463-5003(02)00015-X)
- 62 Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L., Lamarque,
 63 J.-F., . . . others (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their
 64 extensions from 1765 to 2300. *Climatic change*, 109, 213–241. Retrieved from
 65 <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>
- 66 Mizielinski, M., Roberts, M., Vidale, P., Schiemann, R., Demory, M.-E., Strachan,
 67 J., . . . others (2014). High-resolution global climate modelling: the UPSCALE
 68 project, a large-simulation campaign. *Geoscientific Model Development*, 7(4),
 69 1629–1640. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1629-2014>
- 70 Morel, C., & Senesi, S. (2002). A climatology of mesoscale convective systems over
 71 Europe using satellite infrared imagery. I: Methodology. *Quarterly Journal*
 72 *of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences,*
 73 *applied meteorology and physical oceanography*, 128(584), 1953–1971. doi:
 74 10.1256/003590002320603485
- 75 Müller, S. K., Caillaud, C., Chan, S., de Vries, H., Bastin, S., Berthou, S., . . . oth-
 76 ers (2022). Evaluation of Alpine-Mediterranean precipitation events in
 77 convection-permitting regional climate models using a set of tracking algo-
 78 rithms. *Climate Dynamics*, 1–19. Retrieved from [https://doi.org/10.1007/](https://doi.org/10.1007/s00382-022-06555-z)
 79 [s00382-022-06555-z](https://doi.org/10.1007/s00382-022-06555-z)
- 80 Müller, S. K., Pichelli, E., Coppola, E., Berthou, S., Brienens, S., Caillaud, C., . . .
 81 de Vries, H. (2023). The Climate Change Response of Heavy Precipitation
 82 Events over the Alps and in the Mediterranean. *Climate Dynamics*. doi:
 83 10.1007/s00382-023-06901-9
- 84 Nabat, P., Somot, S., Cassou, C., Mallet, M., Michou, M., Bouniol, D., . . . Saint-
 85 Martin, D. (2020). Modulation of radiative aerosols effects by atmospheric
 86 circulation over the Euro-Mediterranean region. *Atmospheric Chemistry and*
 87 *Physics*, 20(14), 8315–8349. Retrieved from [https://doi.org/10.5194/](https://doi.org/10.5194/acp-20-8315-2020)
 88 [acp-20-8315-2020](https://doi.org/10.5194/acp-20-8315-2020)
- 89 NCAR. (2019). The NCAR Command Language (Version 6.6.2), Boulder, Colorado:
 90 UCAR/NCAR/CISL/TDD. [Software]. Retrieved from [http://dx.doi.org/](http://dx.doi.org/10.5065/D6WD3XH5)
 91 [10.5065/D6WD3XH5](http://dx.doi.org/10.5065/D6WD3XH5)
- 92 Neff, E. L. (1977). How much rain does a rain gage gage? *Journal of Hydrology*,
 93 35(3-4), 213–220. doi: 10.1016/0022-1694(77)90001-4
- 94 Nuissier, O., Ducrocq, V., Ricard, D., Lebeaupin, C., & Anquetin, S. (2008). A nu-
 95 merical study of three catastrophic precipitating events over southern France.
 96 I: Numerical framework and synoptic ingredients. *Quarterly Journal of the*
 97 *Royal Meteorological Society*, 134(630), 111–130. doi: 10.1002/qj.200
- 98 Nuissier, O., Joly, B., Joly, A., Ducrocq, V., & Arbogast, P. (2011). A statistical
 99 downscaling to identify the large-scale circulation patterns associated with
 100 heavy precipitation events over southern France. *Quarterly Journal of the*
 101 *Royal Meteorological Society*, 137(660), 1812–1827. doi: 10.1002/qj.866

- 32 Pfahl, S., O’Gorman, P. A., & Fischer, E. M. (2017). Understanding the regional
33 pattern of projected future changes in extreme precipitation. *Nature*
34 *Climate Change*, 7(6), 423. Retrieved from [https://doi.org/10.1038/
35 nclimate3287](https://doi.org/10.1038/nclimate3287)
- 36 Pichelli, E., Coppola, E., Sobolowski, S., Ban, N., Giorgi, F., Stocchi, P., ... oth-
37 ers (2021). The first multi-model ensemble of regional climate simulations
38 at kilometer-scale resolution part 2: future precipitation projections. *Climate*
39 *Dynamics*. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05657-4>
- 40 Powers, J. G., Klemp, J. B., Skamarock, W. C., Davis, C. A., Dudhia, J., Gill,
41 D. O., ... others (2017). The weather research and forecasting model:
42 Overview, system efforts, and future directions. *Bulletin of the American*
43 *Meteorological Society*, 98(8), 1717–1737. Retrieved from [https://doi.org/
44 10.1175/BAMS-D-15-00308.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00308.1)
- 45 Prein, A. F., Liu, C., Ikeda, K., Bullock, R., Rasmussen, R. M., Holland, G. J., &
46 Clark, M. (2020). Simulating North American mesoscale convective systems
47 with a convection-permitting climate model. *Climate Dynamics*, 55, 95–110.
48 doi: 10.1007/s00382-017-3993-2
- 49 Prein, A. F., Liu, C., Ikeda, K., Trier, S. B., Rasmussen, R. M., Holland, G. J.,
50 & Clark, M. P. (2017). Increased rainfall volume from future convective
51 storms in the US. *Nature Climate Change*, 7(12), 880–884. Retrieved from
52 <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0007-7>
- 53 Purr, C., Brisson, E., & Ahrens, B. (2019). Convective shower characteristics
54 simulated with the convection-permitting climate model COSMO–CLM.
55 *Atmosphere*, 10(12), 810. Retrieved from [https://doi.org/10.3390/
56 atmos10120810](https://doi.org/10.3390/atmos10120810)
- 57 Purr, C., Brisson, E., & Ahrens, B. (2021). Convective rain cell characteristics and
58 scaling in climate projections for Germany. *International Journal of Climatol-*
59 *ogy*, 41(5), 3174–3185. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/joc.7012>
- 60 Purr, C., Brisson, E., Schlünzen, K. H., & Ahrens, B. (2022). Convective rain cell
61 properties and the resulting precipitation scaling in a warm-temperate climate.
62 *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148(745), 1768–1781.
63 Retrieved from <https://doi.org/10.1002/qj.4277>
- 64 Raddatz, T., Reick, C., Knorr, W., Kattge, J., Roeckner, E., Schnur, R., ... Jung-
65 claus, J. (2007). Will the tropical land biosphere dominate the climate–carbon
66 cycle feedback during the twenty-first century? *Climate dynamics*, 29, 565–
67 574. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0247-8>
- 68 Rajczak, J., & Schär, C. (2017). Projections of future precipitation extremes
69 over Europe: A multimodel assessment of climate simulations. *Journal*
70 *of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(20), 10–773. Retrieved from
71 <https://doi.org/10.1002/2017JD027176>
- 72 Ribes, A., Thao, S., Vautard, R., Dubuisson, B., Somot, S., Colin, J., ... Soubey-
73 roux, J.-M. (2019). Observed increase in extreme daily rainfall in the French
74 Mediterranean. *Climate Dynamics*, 1–20. Retrieved from [https://doi.org/
75 10.1007/s00382-018-4179-2](https://doi.org/10.1007/s00382-018-4179-2)
- 76 Ricard, D., Ducrocq, V., & Auger, L. (2012). A climatology of the mesoscale en-
77 vironment associated with heavily precipitating events over a northwestern
78 Mediterranean area. *Journal of applied meteorology and climatology*, 51(3),
79 468–488. Retrieved from <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-017.1>
- 80 Rockel, B., Will, A., & Hense, A. (2008). The regional climate model COSMO–CLM
81 (CCLM). *Meteorologische Zeitschrift*, 17(4), 347.
- 82 Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A.,
83 ... Zhou, B. (2021). Chapter 11: Weather and climate extreme events in a
84 changing climate. in: *Ipcc 2021: Climate change 2021: The physical science*
85 *basis. contribution of working group i to the sixth assessment report of the*
86 *intergovernmental panel on climate change.*

- 57 doi: 10.1017/9781009157896.013
- 58 Shepherd, T. G. (2019). Storyline approach to the construction of regional climate
59 change information. *Proceedings of the Royal Society A*, 475(2225), 20190013.
60 Retrieved from <https://doi.org/10.1098/rspa.2019.0013>
- 61 Skamarock, W. (2008). A description of the advanced research WRF version 3.
62 *Tech. Note*, 1–96. doi: 10.5065/D68S4MVH
- 63 Stocchi, P., Pichelli, E., Torres Alavez, J. A., Coppola, E., Giuliani, G., & Giorgi,
64 F. (2022). Non-Hydrostatic RegCM4 (RegCM4-NH): Evaluation of Pre-
65 cipitation Statistics at the Convection-Permitting Scale over Different Do-
66 mains. *Atmosphere*, 13(6), 861. Retrieved from [https://doi.org/10.3390/
67 atmos13060861](https://doi.org/10.3390/atmos13060861)
- 68 Tabary, P., Dupuy, P., Lhenaff, G., Gueguen, C., Moulin, L., Laurantin, O., ...
69 Soubeyroux, J.-M. (2012). A 10-year (1997-2006) reanalysis of Quantitative
70 Precipitation Estimation over France: methodology and first results. *IAHS-
71 AISH publication*, 255–260.
- 72 Trambly, Y., & Somot, S. (2018). Future evolution of extreme precipitation in the
73 Mediterranean. *Climatic Change*, 151(2), 289–302. Retrieved from [https://
74 doi.org/10.1007/s10584-018-2300-5](https://doi.org/10.1007/s10584-018-2300-5)
- 75 van Meijgaard, E., Van Ulft, L., Lenderink, G., De Roode, S., Wipfler, E. L., Boers,
76 R., & van Timmermans, R. (2012). *Refinement and application of a regional
77 atmospheric model for climate scenario calculations of Western Europe* (No.
78 KVR 054/12). KvR.
- 79 Vautard, R., Kadyrov, N., Iles, C., Boberg, F., Buonomo, E., Bülow, K., ...
80 others (2021). Evaluation of the large EURO-CORDEX regional climate
81 model ensemble. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(17),
82 e2019JD032344. Retrieved from <https://doi.org/10.1029/2019JD032344>
- 83 Vautard, R., Yiou, P., van Oldenborgh, G.-J., Lenderink, G., Thao, S., Ribes, A., ...
84 Soubeyroux, J.-M. (2015). Extreme fall 2014 precipitation in the Cévennes
85 mountains. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), S56–S60.
86 Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/26233141>
- 87 Vergara-Temprado, J., Ban, N., & Schär, C. (2021). Extreme sub-hourly precip-
88 itation intensities scale close to the clausius-clapeyron rate over europe. *Geo-
89 physical Research Letters*, 48(3), e2020GL089506. Retrieved from [https://doi
90 .org/10.1029/2020GL089506](https://doi.org/10.1029/2020GL089506)
- 91 Voltaire, A., Sanchez-Gomez, E., y Méliá, D. S., Decharme, B., Cassou, C., Sénési,
92 S., ... others (2013). The CNRM-CM5. 1 global climate model: description
93 and basic evaluation. *Climate Dynamics*, 40(9-10), 2091–2121. Retrieved from
94 <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1259-y>
- 95 Yang, D., Ishida, S., Goodison, B. E., & Gunther, T. (1999). Bias correction of
96 daily precipitation measurements for Greenland. *Journal of Geophysical Re-
97 search: Atmospheres*, 104(D6), 6171–6181. Retrieved from [https://doi.org/
98 10.1029/1998JD200110](https://doi.org/10.1029/1998JD200110)
- 99 Zappa, G., & Shepherd, T. G. (2017). Storylines of atmospheric circulation change
100 for European regional climate impact assessment. *Journal of Climate*, 30(16),
101 6561–6577. Retrieved from <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0807.1>
- 102 Zittis, G., Bruggeman, A., & Lelieveld, J. (2021). Revisiting future extreme pre-
103 cipitation trends in the Mediterranean. *Weather and Climate Extremes*, 34,
104 100380. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100380>

Supporting Information for "Northwestern Mediterranean Heavy Precipitation Events in a warmer climate : robust versus uncertain changes with a large convection-permitting model ensemble"

Cécile Caillaud¹, Samuel Somot¹, Hervé Douville¹, Antoinette Alias¹, Sophie Bastin², Susanne Brienen³, Marie-Estelle Demory^{4,5,6,7}, Andreas Dobler⁸, Hendrik Feldmann⁹, Thomas Frisius¹⁰, Klaus Goergen¹¹, Elizabeth J. Kendon¹², Klaus Keuler¹³, Geert Lenderink¹⁴, Paola Mercogliano¹⁵, Emanuela Pichelli¹⁶, Pedro M. M Soares¹⁷, Merja H. Tölle¹⁸, Hylke de Vries¹⁴

¹CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, Toulouse, France

²Laboratoire ATmosphere Milieux Observations Spatiales/Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), UVSQ

Université Paris-Saclay, Sorbonne Université, CNRS, CNES, Guyancourt, France

³Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach, Germany

⁴Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zurich, Zurich, Switzerland

⁵Wyss Academy for Nature, University of Bern, Bern, Switzerland

⁶Climate and Environmental Physics, Physics Institute, University of Bern, Bern, Switzerland

⁷Oeschger Centre for Climate Change Research, University of Bern, Bern, Switzerland

⁸Norwegian Meteorological Institute, Oslo, Norway

⁹Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, Germany

¹⁰Climate Service Center Germany (GERICS), Helmholtz-Zentrum hereon GmbH, Hamburg, Germany

¹¹Institute of Bio- and Geosciences (IBG-3, Agrosphere), Research Centre Jülich, 52428 Jülich, Germany

¹²Met Office Hadley Centre, Exeter, UK

¹³Chair of Atmospheric Processes, Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg, Cottbus,

Germany

¹⁴Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), De Bilt, The Netherlands

¹⁵Fondazione Centro euro-Mediterraneo sui cambiamenti climatici (CMCC), Caserta, Italy

¹⁶The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Trieste, Italy

¹⁷Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal

¹⁸CESR (Center for Environmental Systems Research), University of Kassel, Kassel, Germany

Contents of this file

1. Text S1 to S3
2. Figures S1 to S21
3. Tables S1 to S2

Introduction The Supporting Information first presents the modelling chain and the pan-Alpine domain in Figure S1, the table of the simulations in Table S1, classified according to the CP-RCM families and the driving GCMs in Figure S2. Text S1 includes the methods used in the study, the precipitating system detection and tracking algorithm and the statistical methods. Text S2 and the associated figures S3 to S10 present the detailed preliminary evaluation of the historical simulations by comparing them with observations. Figures S11 to S16 and Table S2 are the results of the individual simulations for end-century changes. Finally, Text S3 and the associated figures S17 to S21 present the results for the mid-century period.

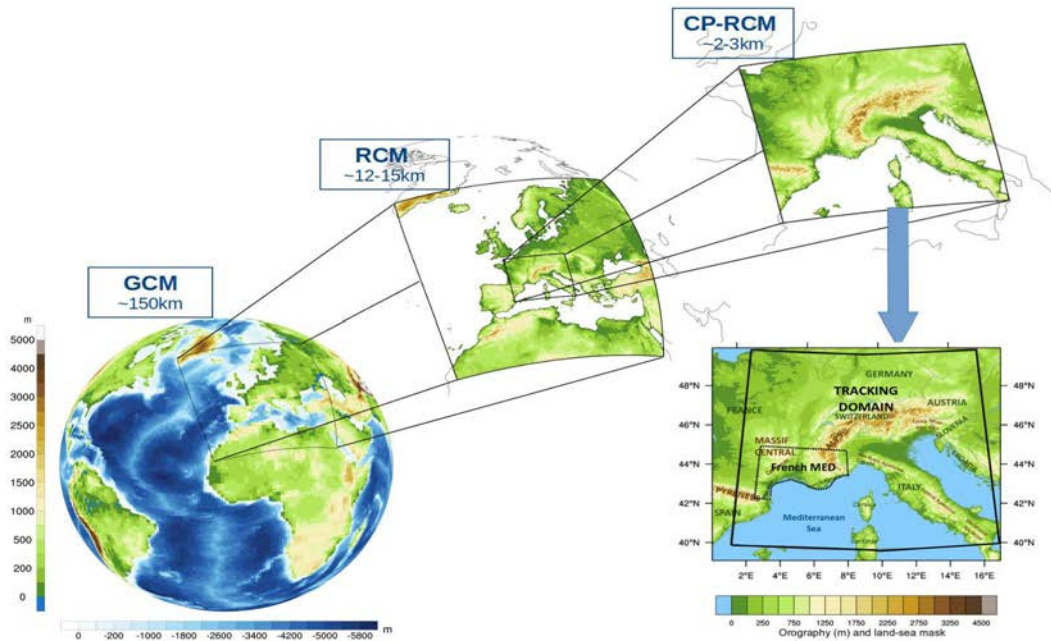


Figure S1. Modelling chain and domain

Illustration of the two-tier modelling chain : the GCM gives the lateral boundary conditions to the RCM which is the driving model of the CP-RCM. At bottom right, CNRM-AROME topography in the physical central zone for the pan-Alpine domain. Delimited by black lines, the regular ALP-3 domain used as the evaluation target grid and also as the tracking domain. Delimited by black dotted lines, the French Mediterranean Area.

Table S1. Simulations table : Modelling systems used the study

NAME	INSTITUTE	CP-RCM	dx (km)	RCM	RCM domain /dx (km)	GCM
AROME-CNRM	CNRM HCLIM-Com (DMI,MET Norway, SMHI)	CNRM-AROME41t1 ^a	2.5	CNRM-ALADIN63 ^b	EUR11/12	CNRM-CM5 r1 ^c (CMIP5)
AROME-HCLIM		HCLIM38-AROME ^d	3	HCLIM38-ALADIN ^d	Europe/12	EC-Earth r12 ^e (CMIP5)
AROME-KNMI		KNMI	HCLIM38-AROME ^d	2.5	RACMO ^f	Europe/12
CCLM-BTU	BTU	COSMO-CCLM5-0-14 ^g	3	COSMO-CCLM4-8-17 ^h	EUR11/12	CNRM-CM5 r1* ^c
CCLM-CMCC	CMCC	COSMO-CCLM5-0-9 ^g	3	COSMO-CCLM5-0-9 ⁱ	EUR11/12	EC-Earth r12 ^e (CMIP5)
CCLM-DWD	DWD	COSMO-CCLM5-0-15 ^g	3	COSMO-CCLM4-8-17 ^h	EUR11/12	HadGEM2-ES r1 ^j (CMIP5)
CCLM-ETHZ	ETHZ	COSMO-crCLIM ^k	2.2	COSMO-crCLIM ^k	Europe/12	MPI-ESM-LR r1 ^l (CMIP5)
CCLM-JLU	JLU	COSMO-CCLM5-0-15 ^g	3	-	-	MPI-ESM-LR r1 ^l (CMIP5)
CCLM-KIT	KIT	COSMO-CCLM5-0-15 ^g	3	COSMO-CCLM4-8-17 ^h	EUR11/12	MPI-ESM-LR r1 ^l (CMIP5)
REMO-GERICS	GERICS	REMO-2017 NH version ^m	3	REMO_MPI -remo2015_v2_mpi ⁿ	Europe/12	MPI-ESM-LR r3 ^l (CMIP5)
RegCM-ICTP	ICTP	RegCM4-7-1 ^o	3	RegCM4-7-1 ^o	Europe/12	HadGEM2-ES r1 ^j (CMIP5)
UM-UKMO	MOHC	HadREM3-RA -UM10.1 ^p	2.2 (REU-2)	HadGEM3-GC3.1 -N512 ^q (HiresMIP)	Global/25	SST-SIC from runs of HadGEM2-ES ^j (CMIP5)
WRF-FZJ-IDL	FZJ, IDL	WRF381CA ^r	3	WRF381CA ^r	EUR15/15	EC-Earth r12 ^e (CMIP5)
WRF-IPSL	IPSL	WRF381CE ^r	3	WRF381CE ^r	EUR15/15	IPSL-CM5A-MR r1 ^s (CMIP5)

^aCaillaud et al. (2021) ^bNabat et al. (2020) ^cVoldoire et al. (2013)

For CNRM-AROME41t1, a bug was recently found in the GHG concentrations : they evolve, but do not completely follow the RCP8.5 scenario.

^dBelušić et al. (2020) ^eHazeleger et al. (2012) ^f[van Meijgaard et al. (2008, 2012); de Vries et al. (2022)]

CNRM-CM5 r1*: for the historical simulation of CCLM-BTU, the RCM had lateral boundary conditions coming from a CNRM-CM5 GCM run taken from another simulation member by mistake, and therefore, not consistent with SST and SIC (<https://www.euro-cordex.net/078730/index.php.en>)

^g[Rockel et al. (2008); Baldauf et al. (2011)] ^hKeuler et al. (2016) ⁱAdinolfi et al. (2021) ^jJones et al. (2011) ^kLeutwyler et al. (2017)

^l[Marsland et al. (2003); Raddatz et al. (2007)] ^m[Coppola et al. (2020); Ban et al. (2021)] ⁿ[Jacob et al. (2012); Vautard et al. (2021)]

^o[Giorgi et al. (2012); Coppola et al. (2021)] ^pChan et al. (2020) ^qMizielinski et al. (2014)

HadREM3-RA-UM10.1 is driven by a global high resolution GCM (25km) with prescribed Sea Surface Temperatures (SST) coming from daily observed SST for the historical simulation and from observed SST plus 20-year mean changes derived from coupled simulations of HadGEM2-ES for future simulations.

^r[Powers et al. (2017); Skamarock (2008)] ^sDufresne et al. (2013)

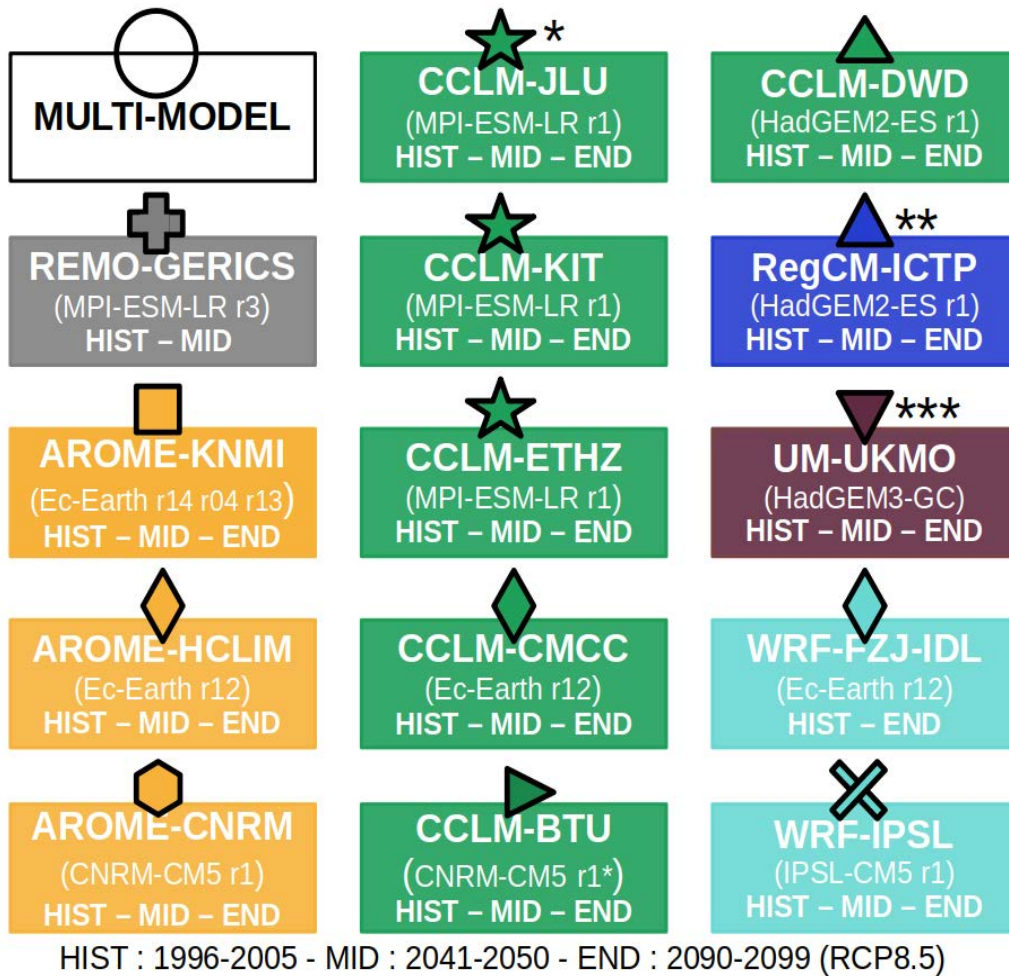


Figure S2. Positioning of the different simulations in the panel figures arranged according to the families of CP-RCMs (one color per family of CP-RCM) and driving GCMs (one symbol per GCM). Available periods (HIST, MID, END) are also specified.

* CCLM-JLU : direct downscaling from the GCM.

** RegCM-ICTP : MID : 2040-2049.

*** UM-UKMO : downscaling from a 25-km GCM with prescribed SST coming from HadGEM2-ES runs. HIST: 1998-2007 - MID: 2040-2049 - END: 2096-2105

Text S1 : Methods

Precipitating system detection and tracking algorithm

To identify and characterize the northwestern Mediterranean heavy precipitating systems, we apply a specific detection and tracking algorithm (Morel & Senesi, 2002; Caillaud et al., 2021) onto successive 1-hour accumulated precipitation fields. This method has already been used for high-frequency precipitation evaluation in a single-model study (Caillaud et al., 2021) and in a first-of-its-kind multi-model study (Müller et al., 2022). It can be summarised as follows:

1. Spatial smoothing on 3x3 grid points;
2. Detection of the precipitating systems every hour with a minimum surface of 20km² and contiguous grid points exceeding the 10mm/h intensity threshold in order to select convective heavy precipitation;
3. Tracking of system trajectories by identifying links between systems at different time steps according to overlapping and correlation conditions;
4. Diagnostics: spatial distribution, number per year, duration (in h), mean and maximum intensity (MeanInt and MaxInt, in mm/h), mean and maximum area (MeanArea and MaxArea, in km²), maximum propagation speed (MaxSpeed, in m/s), volume (in m³) and severity (in m³).

Further details can be found in Caillaud et al. (2021).

The formula of the **volume** is as follows:

$$volume = \sum_{duration} \alpha \times I_{mean} \times A \times dt \quad (1)$$

with *volume* in m³, $\alpha = 1/1000$ coefficient to convert mm.km² to m³, I_{mean} the mean intensity of each cell of the track in mm/h, A its area in km², $dt = 1h$.

The **severity index**, first defined in Caillaud et al. (2021), is introduced in order to characterise the most severe tracks with an hydrological impact point of view by taking into account the travel speed of the systems. The formula of the severity index is as follows:

$$severity = \sum_{duration} \alpha \times I_{mean} \times A \times \frac{S_{max}}{S} \times dt \quad (2)$$

with *severity* in m³, $\alpha = 1/1000$ coefficient to convert mm.km² to m³, I_{mean} the mean intensity of each cell of the track in mm/h, A its area in km², S its propagation speed in m/s, $S_{max} = 35m/s$, $dt = 1h$.

Statistics

The **Root Mean Square Error (RMSE)** is added in Figures S3 and S5 in order to quantify the differences between the densities of cells above 10mm/h (i.e. the number of cells above 10mm/h per year and per grid point, taking into account the area of each cell) proposed by the simulations (D_{simu}) and those observed (D_{obs}) over a defined area (France or Italy in our study). RMSE is calculated as follows:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_{simu_i} - D_{obs_i})^2} \quad (3)$$

with n the number of grid points and D the density of cells above 10mm/h.

The **bootstrapping method** is used to validate the statistical significance of historical simulations bias by comparing to observations (cf. Figure S6 a) and the sign of future changes by comparing historical and mid or end-century (cf. Figures 2 a and S18

a), at the 90% confidence level, for the relative means of all track characteristics. Observations, historical and end-century track datasets are resampled (100 resamples) with replacement for time blocks of one-season in order to avoid over-confident estimates due to temporal correlation. We then calculate the means of track characteristics for each resampled datasets and compute the 5th–95th percentile ranges of the differences between the means of the two datasets. For each characteristics, if the zero value is included in the range, we conclude that the difference between the means of the two datasets is not significant at the 90% confidence level.

The **Generalized Pareto Distribution** (GPD, Coles et al. (2001)) is used to fit the tail of the distribution of the tracks' maximum intensities and in particular to infer return period values greater than 10 years for observations, historical and scenario simulations (cf. Figures 2 (h) and S15). GPD is preferred to GEV because it allows greater sampling.

GPD is a family of continuous probability distributions, often used to model the tails of another distribution and specified by three parameters: location μ , scale σ and shape ξ . Here, we assume the location parameter is 0 and the shape ξ is a given threshold for tracks' maximum intensity.

The probability density function of $I_{max} \sim \text{GPD}(\mu = 0, \sigma, \xi)$ ($\sigma > 0$) is defined by :

$$g(\sigma, \xi)(x) = \frac{e^x}{\sigma} \left(1 + \frac{\xi e^x}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi} - 1} \quad (4)$$

This threshold is chosen in order to have a sufficient number of values, but also to be representative for the Mediterranean HPEs. The threshold is first chosen based on the observations: the 97th percentile of the tracks' maximum intensities (46mm/h) is consistent with the thresholds used in the operational weather warning system of Météo-France for heavy precipitation in southeastern France and is therefore chosen. For each model, the fixed threshold is then the 97th percentile of the tracks' maximum intensities for the historical simulation. A focus is done on the 20-year return period values, commonly used in climate studies (Tramblay & Somot, 2018; Rajczak & Schär, 2017). As several tracks may be part of the same event, a potential problem of interdependence of the data should be taken into account when interpreting the results.

Text S2 : Evaluation of the historical simulations

The preliminary step before studying future changes is to check the ability of the 14 CP-RCMs historical simulations to reproduce the main characteristics of fall north-western Mediterranean HPEs. When evaluating the simulations, we should not expect perfect matches with the observations because they are not hindcasts driven by reanalyses, but short duration (10-year) historical simulations driven by different GCMs and RCMs, each with their own natural variabilities.

Observational precipitation datasets

In order to evaluate the historical simulations, we need high-resolution (hourly, kilometeric) observational gridded datasets available on overlapping long periods. Over our study area and for our subject of study, only COMEPHORE and GRIPHO datasets fulfill the conditions.

The hourly, 1km grid COMEPHORE data is available over metropolitan France, for the period 1997-2022 (<https://radarsmf.aeris-data.fr/en/>, Tabary et al. (2012); Fumière et al. (2020); Caillaud et al. (2021)). This product is a combination of rain gauges and radar measurements.

Over Italy, the hourly, 3km grid GRIPHO is available for the period 2001–2016 (Fantini, 2019). This dataset is only based on rain gauge measurements.

The use of rain gauges merged with high-resolution (around 1 km), temporally and spatially continuous weather radar data in the COMEPHORE dataset allows to compensate for the insufficient density of rain gauges and improve the reliability of the precipitation dataset except over mountainous regions (above 1500m) where both products are known to underestimate precipitation due to under-catchment issue for the rain-gauges and mask effect problem in areas with high altitude for the radar data.

The two datasets are combined for the longest common period (2001-2016). As the historical simulations cover periods of 10 years, comparison tests with two 10-year observation periods (2001-2010 and 2007-2016) were performed and showed relatively small differences: the longest period available was therefore chosen.

Spatial distribution over the pan-Alpine domain

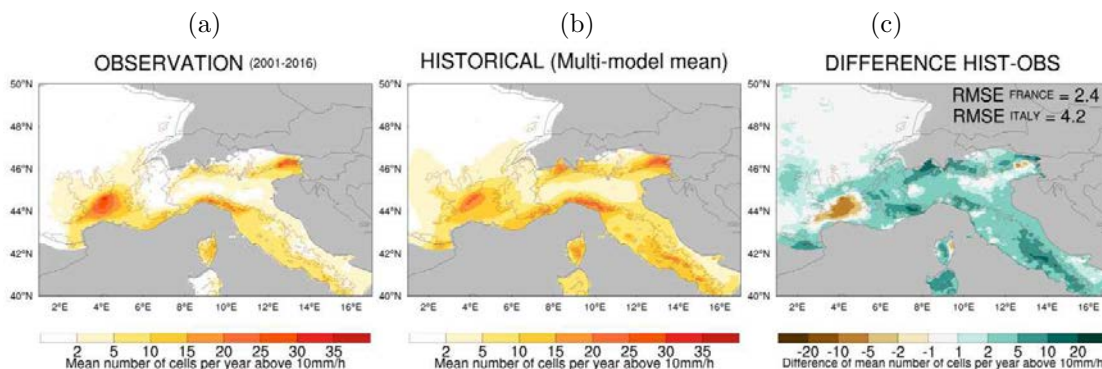


Figure S3. Spatial density of cells above 10mm/h (number per year) during extended fall (SOND) for the observations (2001-2016), the historical period (1996-2005) for the multi-model mean and the raw differences between multi-model mean and observations with RMSEs indicated over France and Italy. On all figures, orography (750 m) is plotted in brown lines.

We first compare the fall spatial densities for precipitating systems above 10mm/h, which are well representative of the areas affected by fall HPEs. By comparing the distributions for the observations and the multi-model mean of the historical simulations on the pan-Alpine domain (cf. Figures S3 a, b), we can first conclude that the multi-model ensemble mean behaves well in terms of number and geographical positioning of the areas known to be affected by fall HPEs that are in the South-East of France, in particular the Cevennes foothills, the French Riviera and the eastern part of Corsica, the Italian western coast with the Ligurian region and the foothills of the Carnic Alps. Same conclusion can be drawn when looking at the panel of the simulations (cf. Figure S4) even though differences in density values can be observed among simulations. The absolute differences (cf. Figure S3 c) and the Root Mean Square Error (RMSE, as defined in Text S1) values for France and Italy given on each plot indicate an overall tendency to simulate higher density values compared to the observations. This is particularly true over mountainous regions, where the underestimation of observed precipitation is known (Neff, 1977; Yang et al., 1999), which makes it difficult to draw conclusions on the models true capacity. It is also true over Italy with larger RMSE values but the reliability of the data can be also questioned because GRIPHO is solely based on station data without the addition of radar data. Some discrepancies between the simulations (cf. Figure S5) are also observed, with some simulations showing larger values than others, such as AROME-CNRM or CCLM-JLU or lower values, such as REMO-GERICS or CCLM-DWD. Classifying the simulations by type of CP-RCM or by driving GCM, no systematic behaviour becomes apparent. However, in the Cevennes foothills where COMEPHORE data is reliable, the multi-model mean, as well as each simulation (but to a lesser extent in the AROME ones), propose lower density values than in the observations. This underestimation is also found in Müller et al. (2022) where the CP-RCMs hindcast simulations ensemble is evaluated and may suggest weaknesses in all the CP-RCMs to properly capture mesoscale convective processes that take place in the foothills or on the plain such as cold pools (Hirt et al., 2020).

Focus on the French Mediterranean HPEs

We now focus on French Mediterranean HPEs (as defined in 2.2). Figure S6 (a) summarizes the differences to observations for the multi-model mean and for each simulation for the main characteristics of the precipitating systems and indicates the significant biases at the 90% confidence level thanks to a bootstrapping method described in Text S1. We first notice the similar numbers of precipitating systems between the multi-model mean and the observations ("Number", respectively 224/year and 229/year), but with differences among simulations ranging from -73% to +49%. The information about the number of days exceeding 100mm/d ("Nb100") is also added. It can be seen as a proxy of the number of days with favourable synoptic conditions for HPEs and shows similarity between simulations and observation. A significant overestimation of duration (+15% for the multi-model mean) is found in most simulations. Overestimation of mean and maximum areas is also found, significant and larger with the REMO simulation and to a lesser extent with the AROME and RegCM simulations. As a result, there is also a greater difference in volume and severity for these simulations (exceeding +200% for REMO-GERICS). For mean and maximum intensities, there is no significant differences between most simulations and observations, except RegCM with an overestimation of + 23% of the maximum intensities and AROME-CNRM, REMO-GERICS, CCLM-JLU and CCLM-CMCC with an underestimation. Most of the simulations significantly overestimate the systems propagation speeds. The CCLM, WRF and UM simulations perform quite well for most of the characteristics.

The overestimations of duration and area are also found in Brousseau et al. (2016) for the AROME model, but are reduced when the resolution is further increased (indeed, among the AROME simulations, the 3km one presents larger areas than the two 2.5km ones). The REMO biases might be also linked to adjustments in the horizontal diffusion

that still need to be done. The known underestimation of the highest intensities is also found for the AROME simulations (Caillaud et al., 2021; Brousseau et al., 2016) as opposed to RegCM which simulates too high maximum intensities (Stocchi et al., 2022). In the evaluation of the CP-RCMs hindcast ensemble (Müller et al., 2022), the overestimation of the duration is found similarly. On the other hand, Müller et al. (2022) indicate an overall underestimation of the areas and higher maximum intensities, but these discrepancies can arise from differences in the track selection, but also in the selected domain (not only the French Mediterranean) and season (the whole year).

In order to combine some basic track characteristics, we present IDH plots (maximum Intensity Duration Histogram, cf. Figures S6 b,c,d) and IAH plots (maximum Intensity maximum Area Histogram, cf. Figures S6 e,f,g), which present the distribution of tracks' frequency by duration or area and intensity. Frequency is defined as the combined occurrence of maximum intensity and duration or area values in chosen bins, normalised by the total number of tracks. Similar patterns between multi-model mean (c,f) and observations (b,e) are found for both IDH and IAH. The absolute difference plots (d,g) confirm the tendency to overestimate lifetimes and areas whatever the intensity. Looking at the panel of IDH differences among simulations (cf. Figures S7 and S8), no similarity in behaviour can be found among the CCLM simulations. However, a similar behaviour of the three simulations with the AROME CP-RCM can be noted with an overestimation of the duration, but also an underestimation of the highest maximum intensities, in particular for AROME-CNRM in agreement with Brousseau et al. (2016) and Caillaud et al. (2021). On the contrary, the two simulations driven by HadGEM2-ES (CCLM-DWD and in particular RegCM-ICTP) and the one driven by HR-HadGEM3-GC propose higher maximum intensities than in the observations. Focusing now on the panel of IAH simulations (cf. Figures S9 and S10), we also find a close behaviour of the three simulations with AROME that propose an overestimation of the areas, but more patchy among the other simulations. REMO-GERICS presents the most discrepancy with respect to the observations, whether it is for the number of tracks, the overestimation of the lifetimes and especially the areas.

Focusing on the most intense tracks (i.e. those with maximum intensities above the 97th percentile of maximum intensities, figure not shown), the multi-model mean also presents an overestimation of durations and areas, and thus of rain volumes and severities. Propagation speeds also are overestimated. If we look at the behaviour of each model, some comments we made considering all tracks are still valid and often amplified: a large overestimation of areas with RegCM and AROME often associated to an overestimation of durations leads to overestimation of volume (up to +216% with AROME-HCLIM) and severity. UM-UKMO simulation also overestimates areas. Concerning intensities, RegCM proposes the largest overestimation while AROME-CNRM underestimates maximum intensities around -30%.

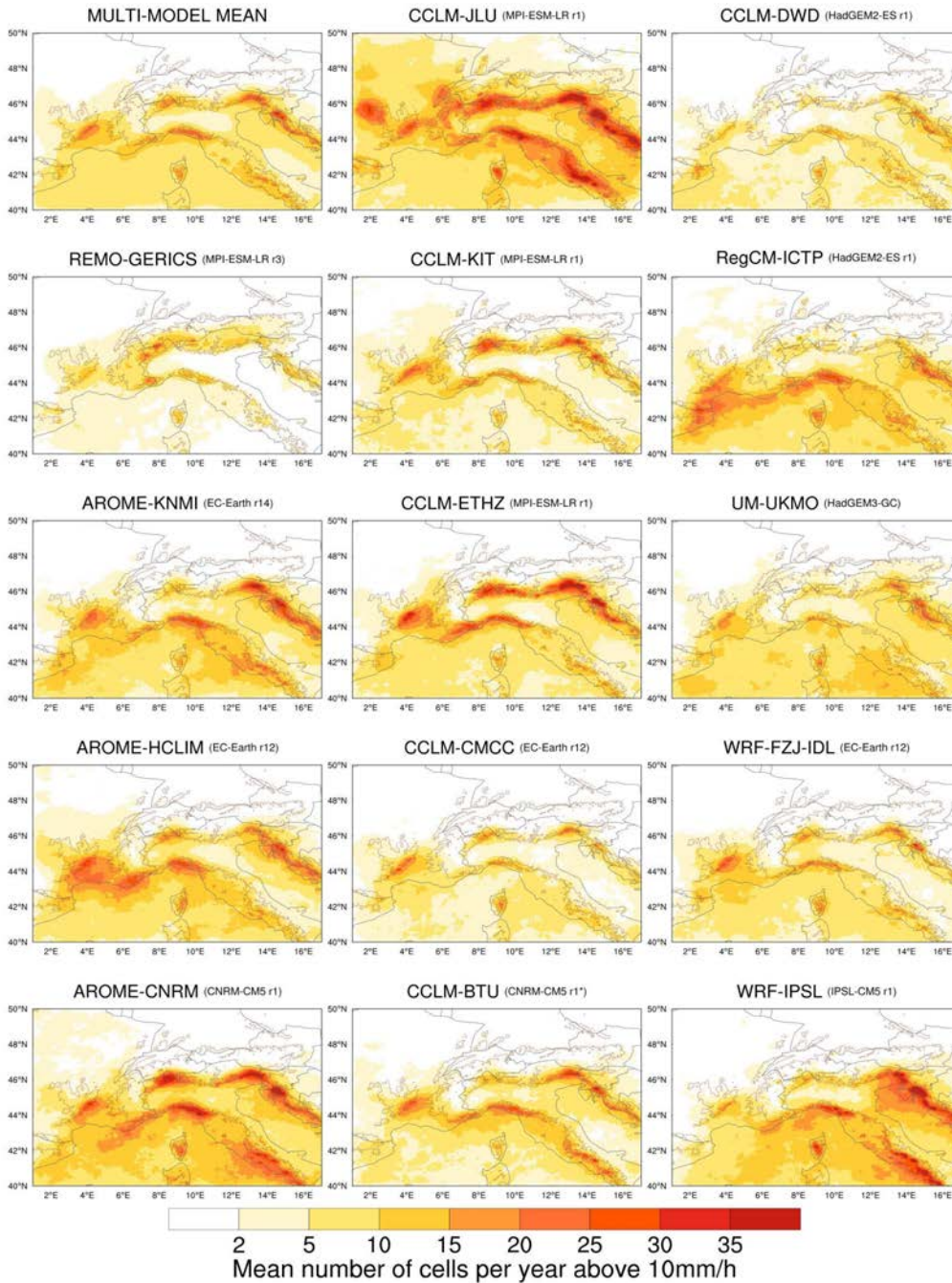


Figure S4. Spatial densities of cells above 10mm/h (number per year) during extended fall (SOND) for the historical period (1996-2005) for the multi-model mean and the 14 CP-RCMs. On all figures, orography (750 m) is plotted in brown lines.

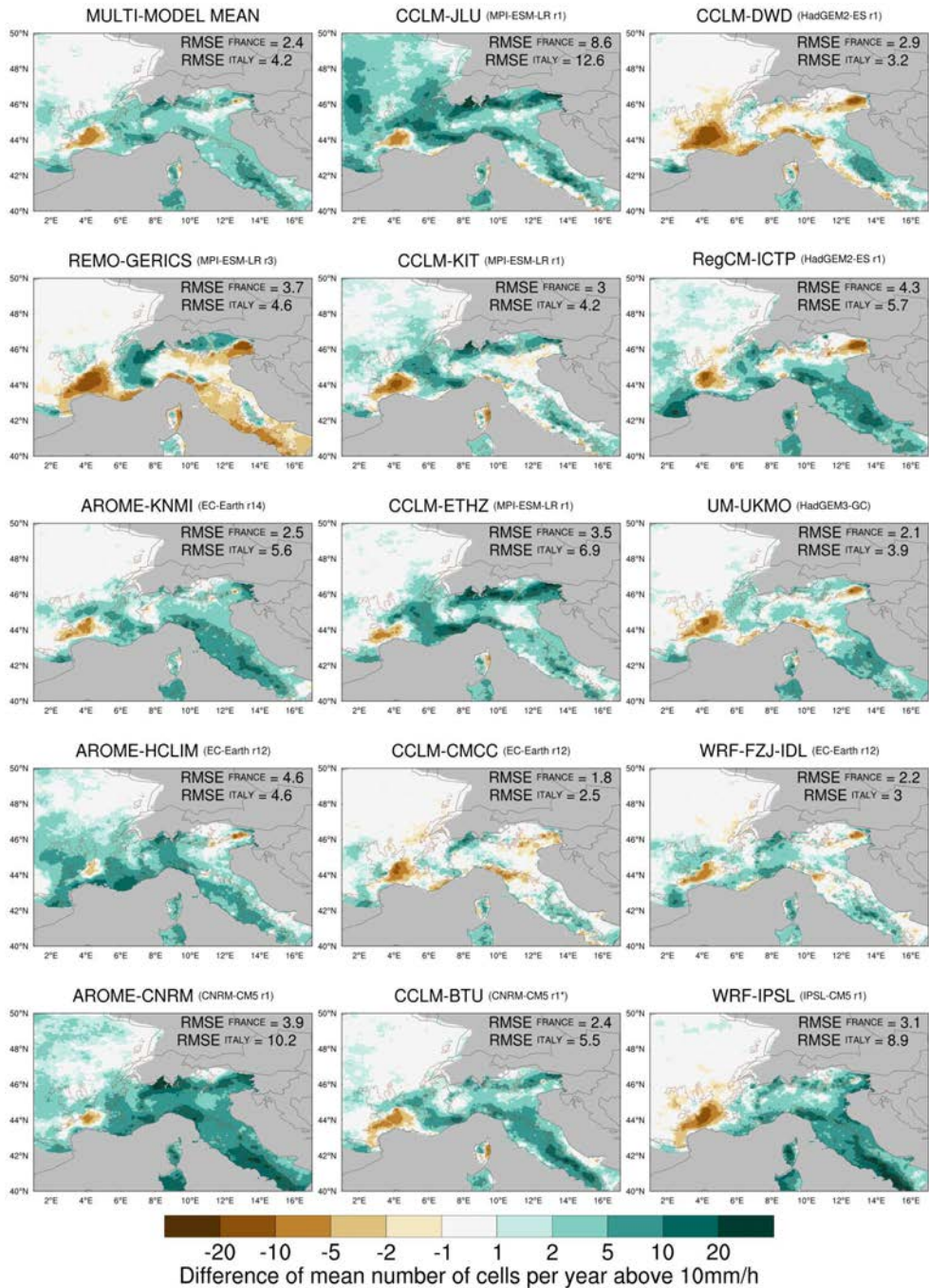


Figure S5. Raw differences of spatial density of cells (number per year) above 10mm/h during extended fall (SOND) between the historical period (1996-2005) and the observations (2001-2016) for the multi-model ensemble mean and for the 14 CP-RCMs. The Root Mean Square Errors (RMSEs) are indicated over France and Italy for each simulation. On all figures, orography (750 m) is plotted in brown lines.

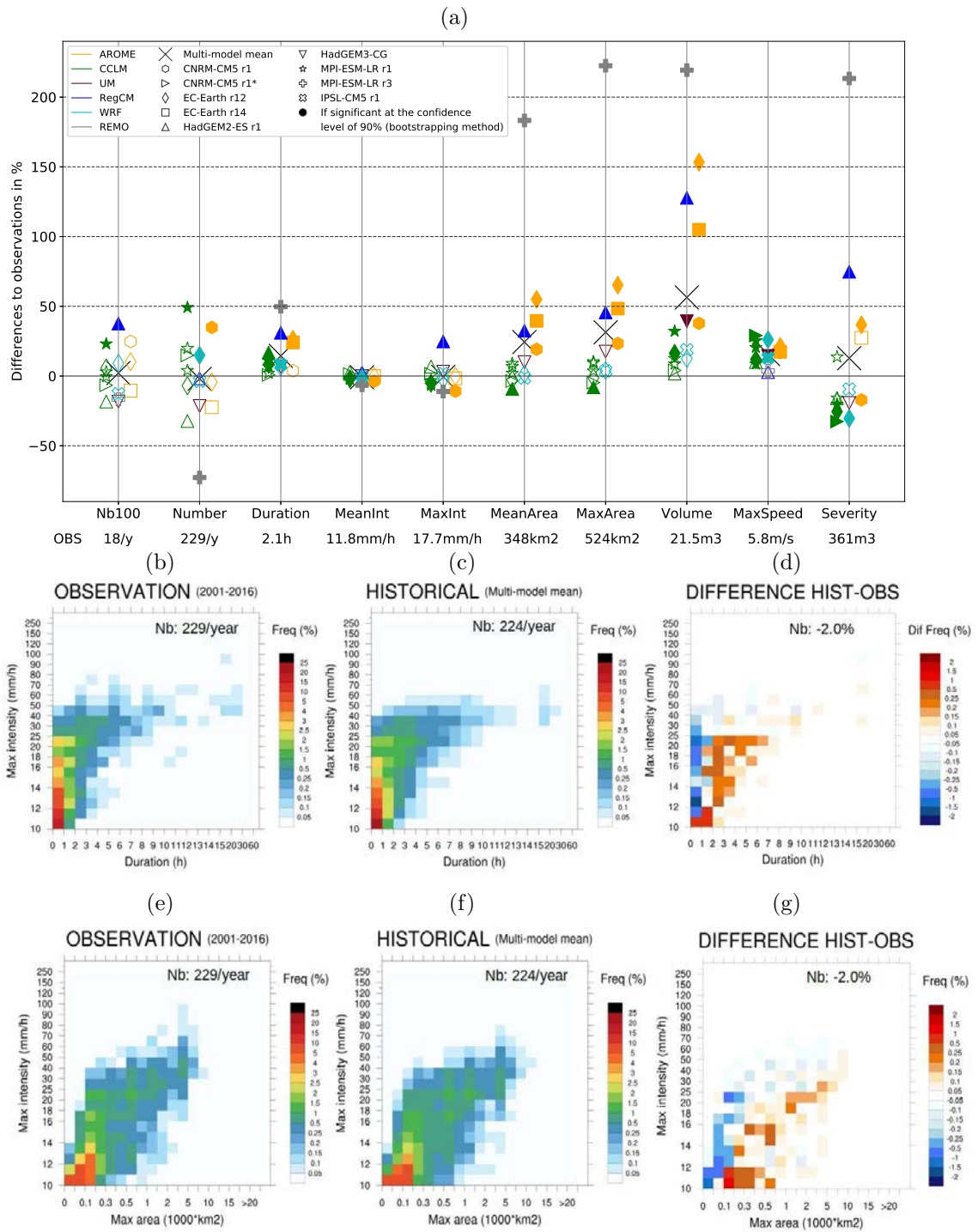


Figure S6. (a) main characteristics' differences (in %) between the historical period and the observations for the multi-model mean and the 14 CP-RCMs (one colour per family of CP-RCM and one symbol per driving GCM). Maximum Intensity Duration Histogram (IDH) plots (b,c,d) and maximum Intensity Area Histogram (IAH) plots (e,f,g) for the observations (2001-2016) (b,e), the multi-model mean for the historical period (1996-2005) (c,f) and the differences between the historical period and the observations (d,g). We consider all tracks of cells above 10 mm/h occurring during days exceeding 100 mm/day in the French Mediterranean area during the extended fall (SOND).

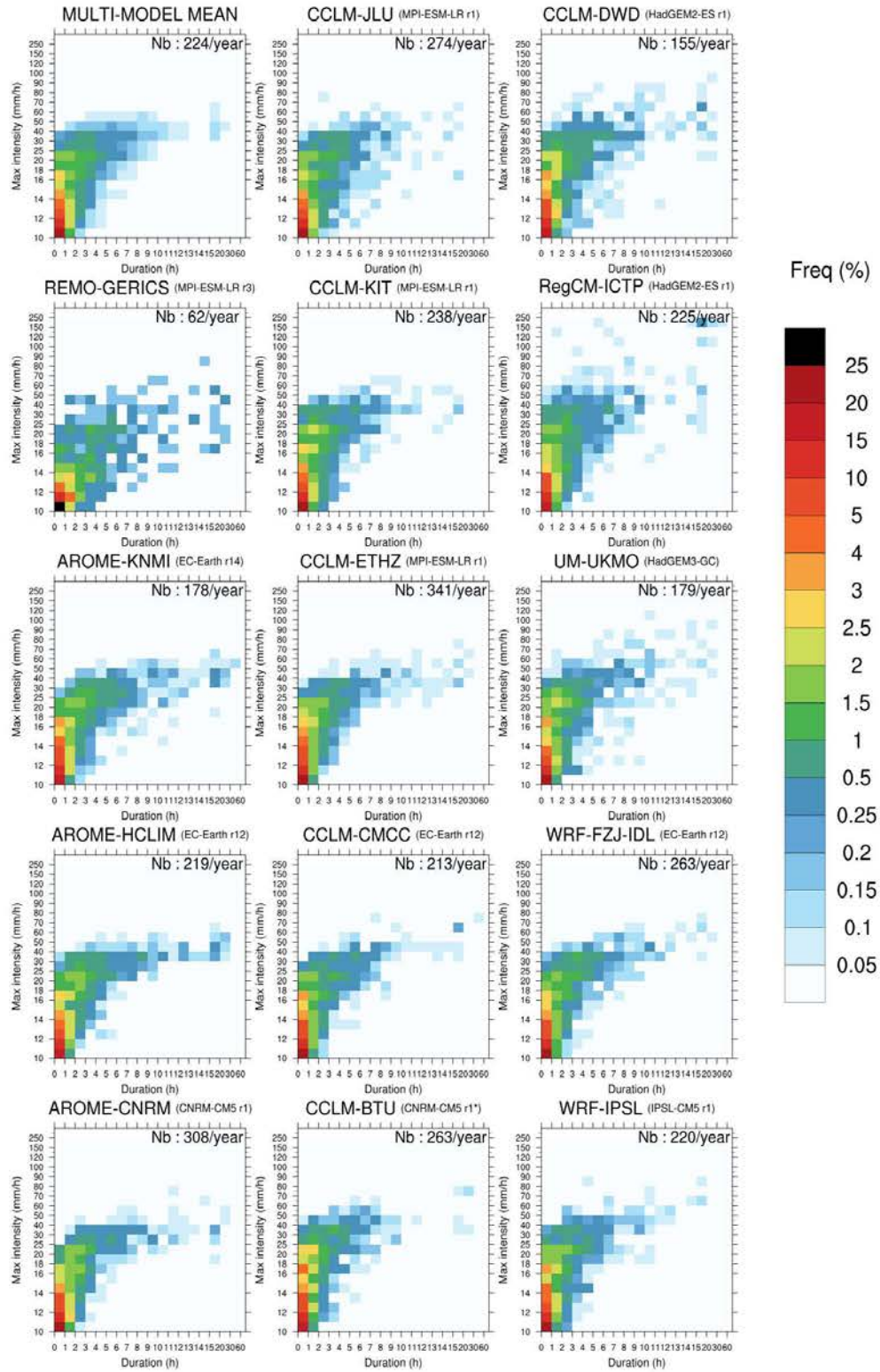


Figure S7. Maximum Intensity Duration Histogram (IDH) plots considering all tracks of cells above 10 mm/h occurring during days exceeding 100 mm/day in the French Mediterranean area during the extended fall (SOND) for the historical period (1996-2005) for the multi-model mean and the 14 CP-RCMs (the mean number of tracks per year is given for each simulation).

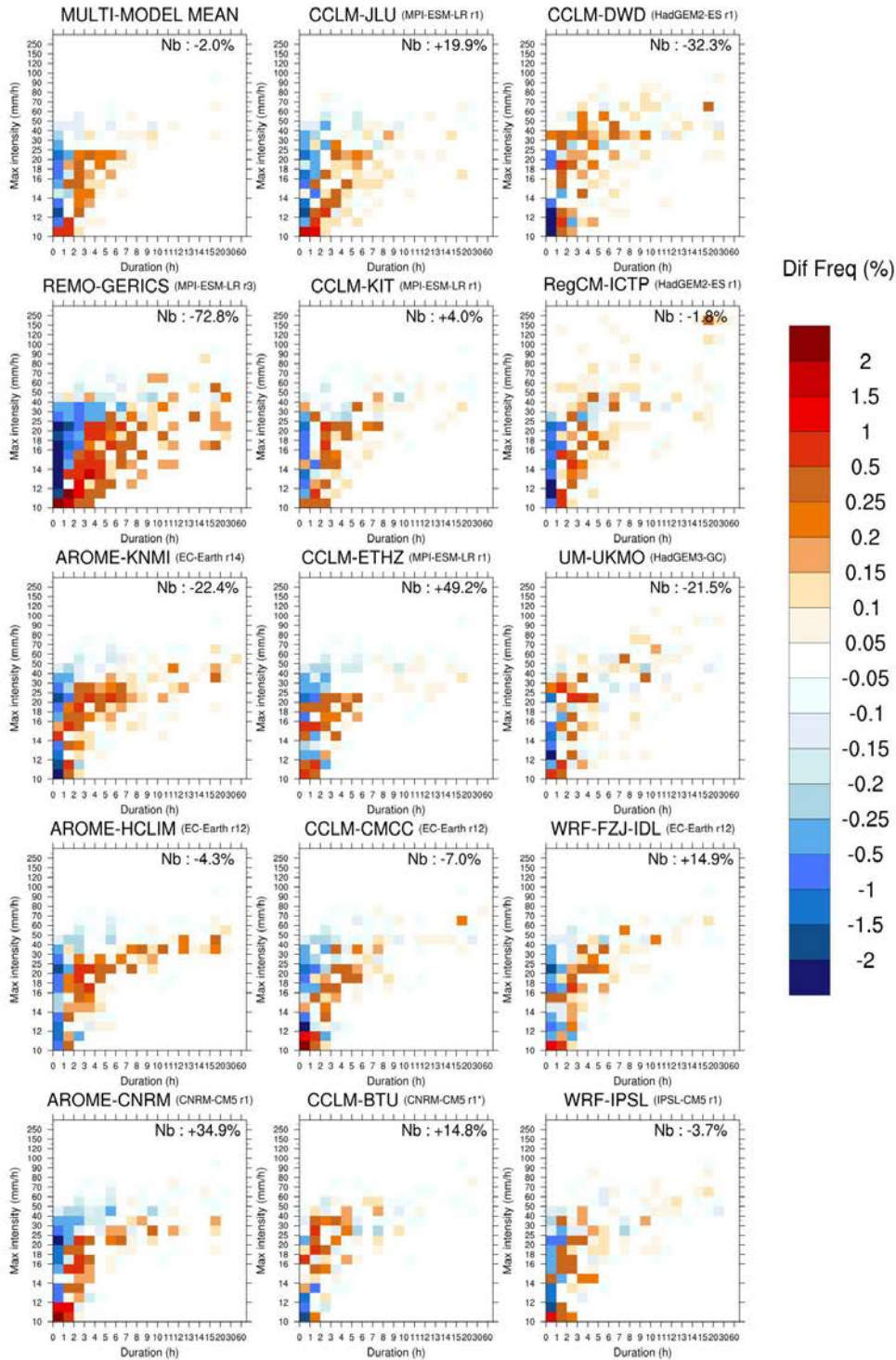


Figure S8. Differences of Maximum Intensity Duration Histogram (IDH) plots considering all tracks of cells above 10 mm/h occurring during days exceeding 100 mm/day in the French Mediterranean area during the extended fall (SOND) between the historical period (1996-2005) and the observations (2001-2016) for the multi-model mean and the 14 CP-RCMs (the difference of mean number of tracks per year is given for each simulation).

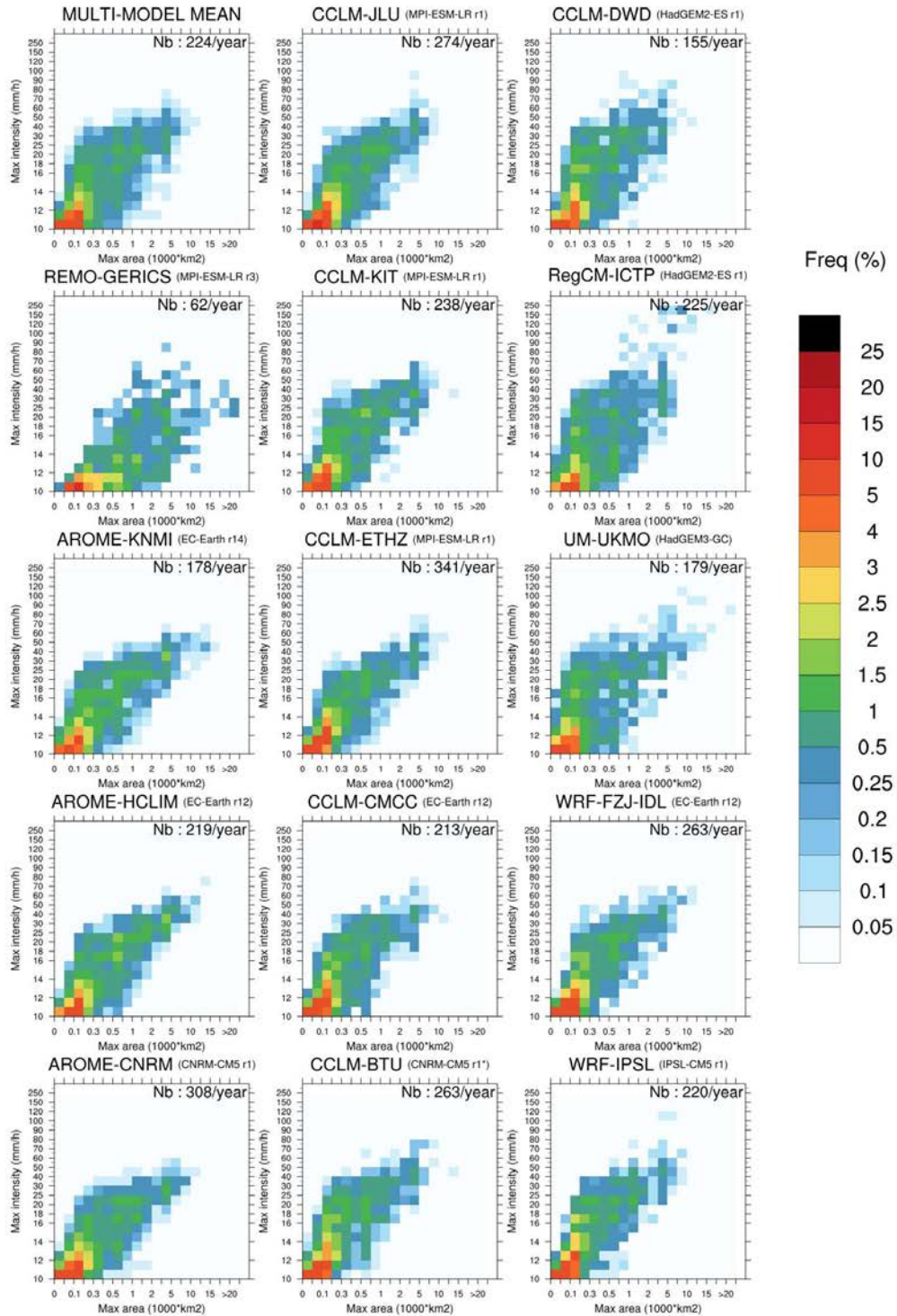


Figure S9. Same as S7 but for Maximum Intensity Area Histogram (IAH).

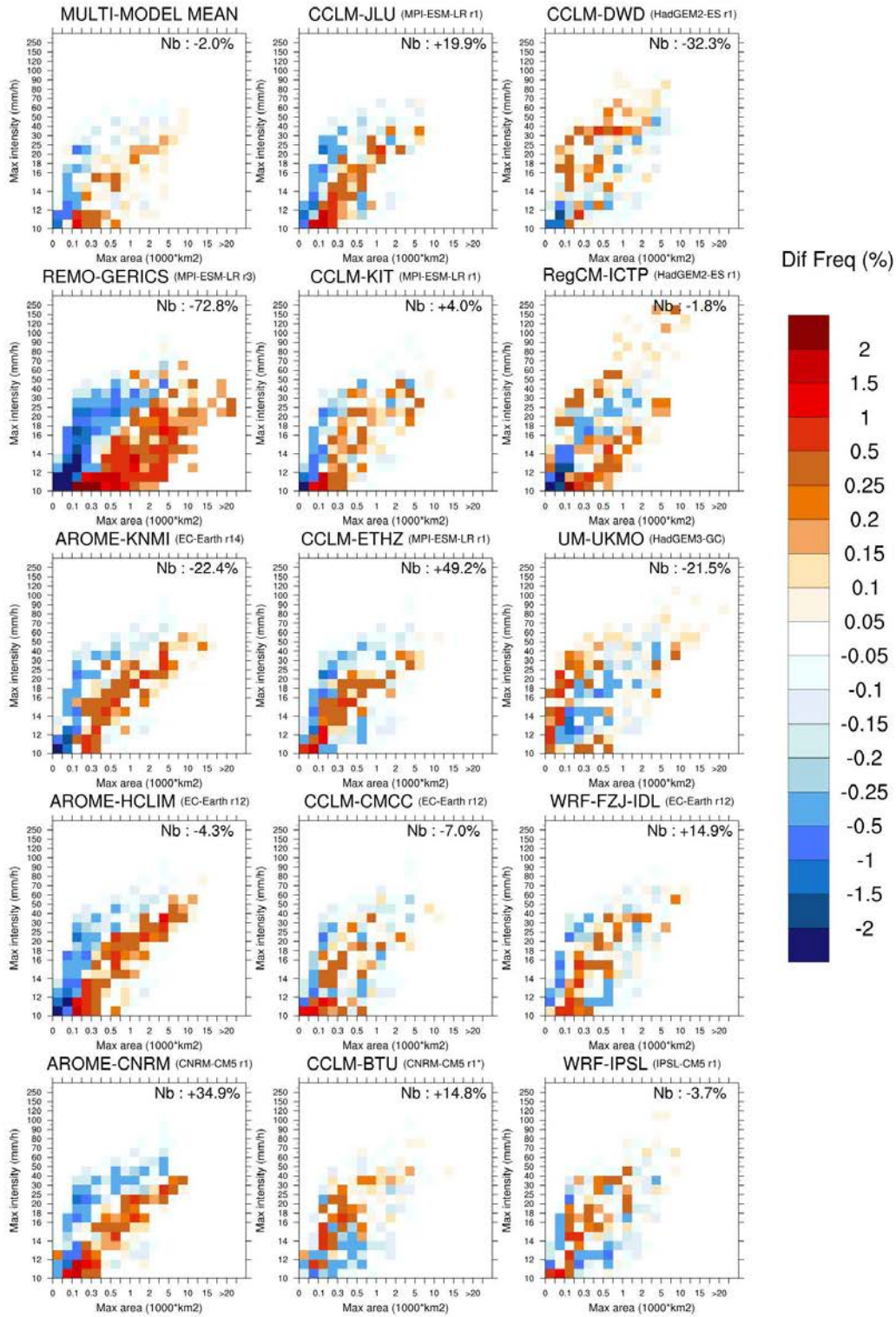


Figure S10. Same as S8 but for Maximum Intensity Area Histogram (IAH).

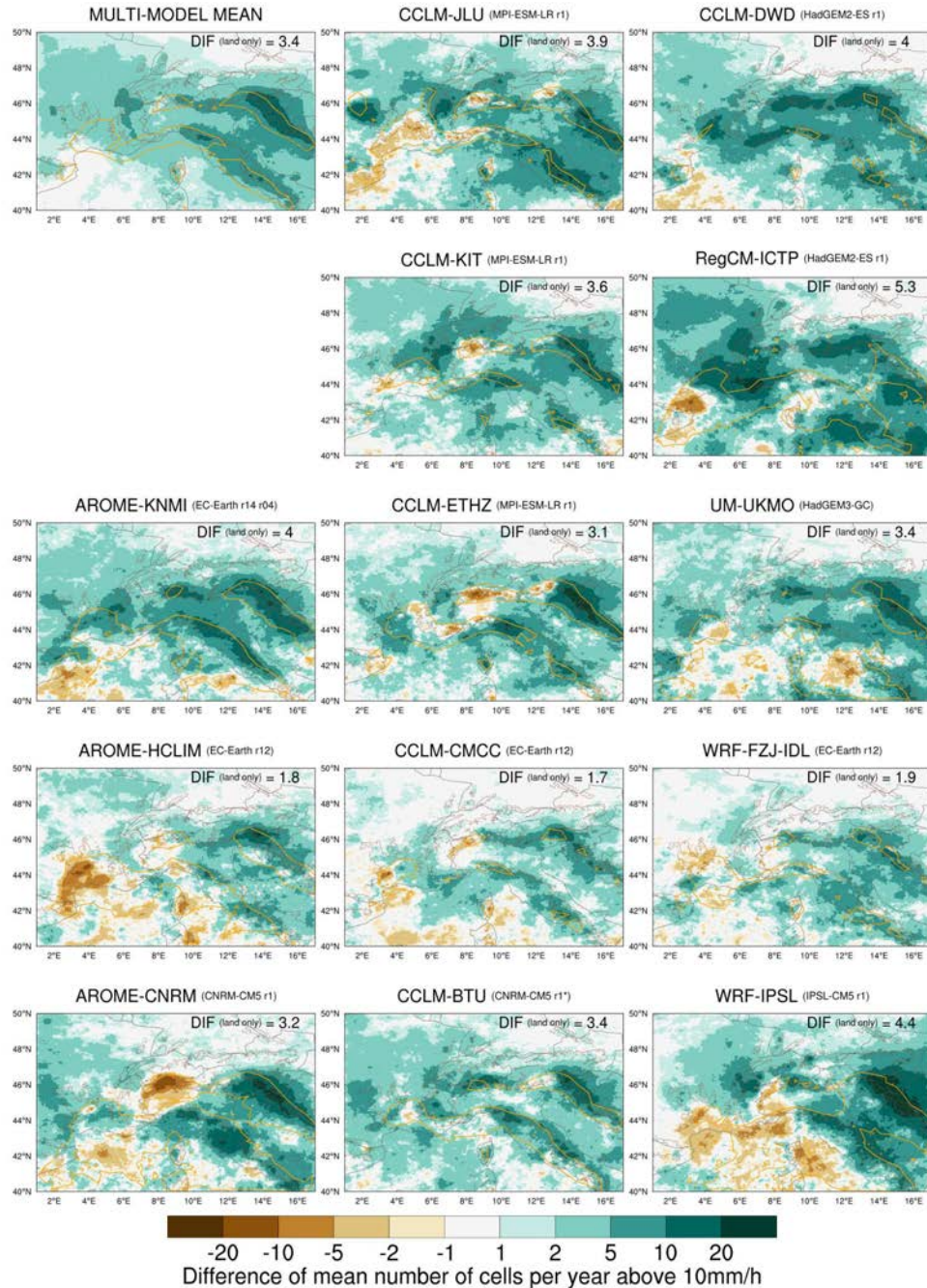


Figure S11. Raw differences of spatial density of cells above 10mm/h during extended fall (SOND) between the end-century period (2090–2099, RCP8.5) and the historical period (1996–2005) for the multi-model ensemble mean and for the 13 CP-RCMs. The absolute difference of number of cells per year over land is indicated for each simulation and in orange, the 10-cell contour isolines for the historical period well representative of the present-day areas known to be affected by Mediterranean HPEs. On all figures, orography (750 m) is plotted in brown lines.

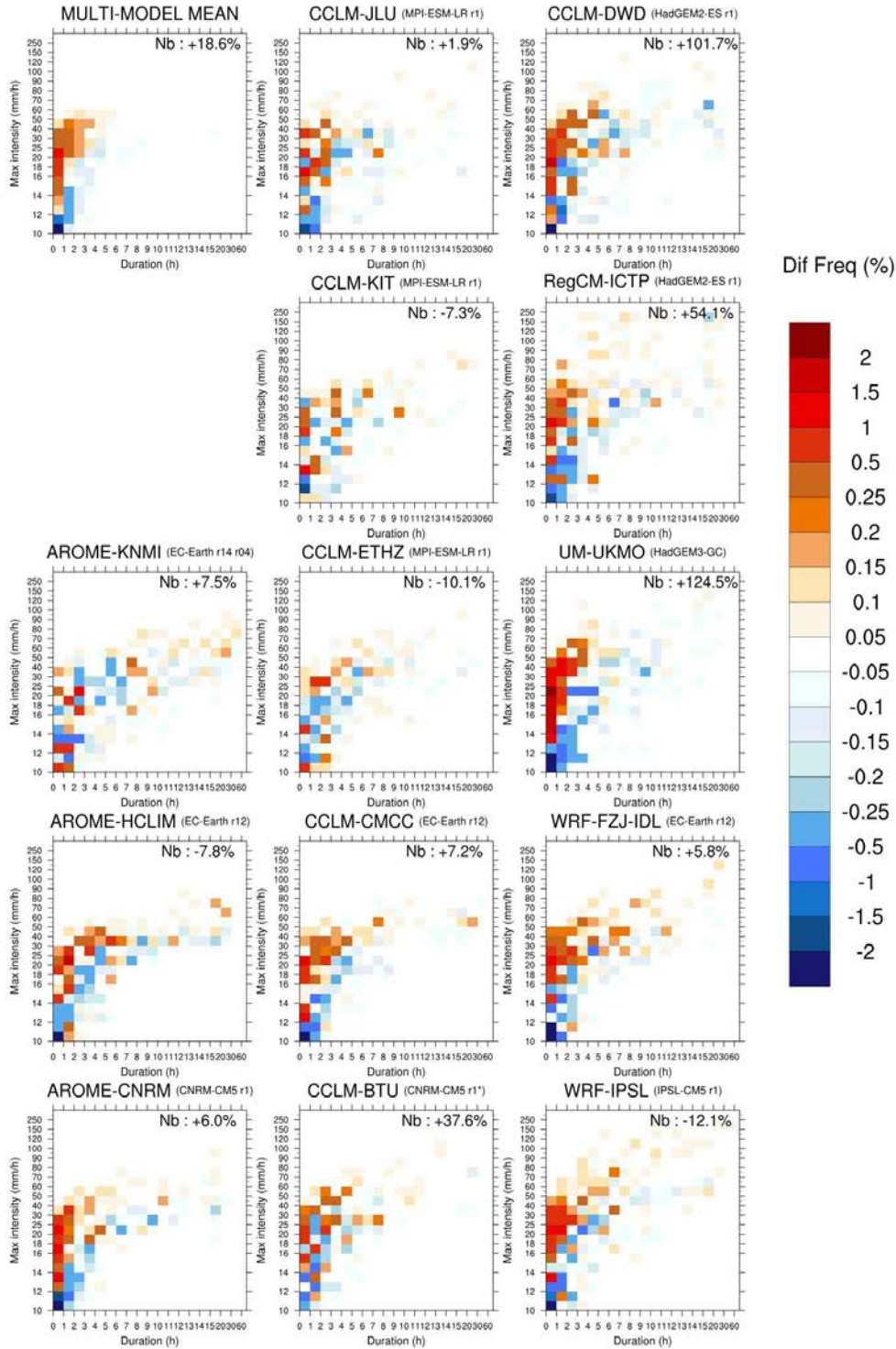


Figure S12. Differences of Maximum Intensity Duration Histogram (IDH) plots considering all tracks of cells above 10 mm/h occurring during days exceeding 100 mm/day in the French Mediterranean area during the extended fall (SOND) between the end-century period (2090-2099, RCP8.5) and the historical period (1996-2005) for the multi-model mean and the 13 CP-RCMs (the difference of mean number of tracks per year is given for each simulation).

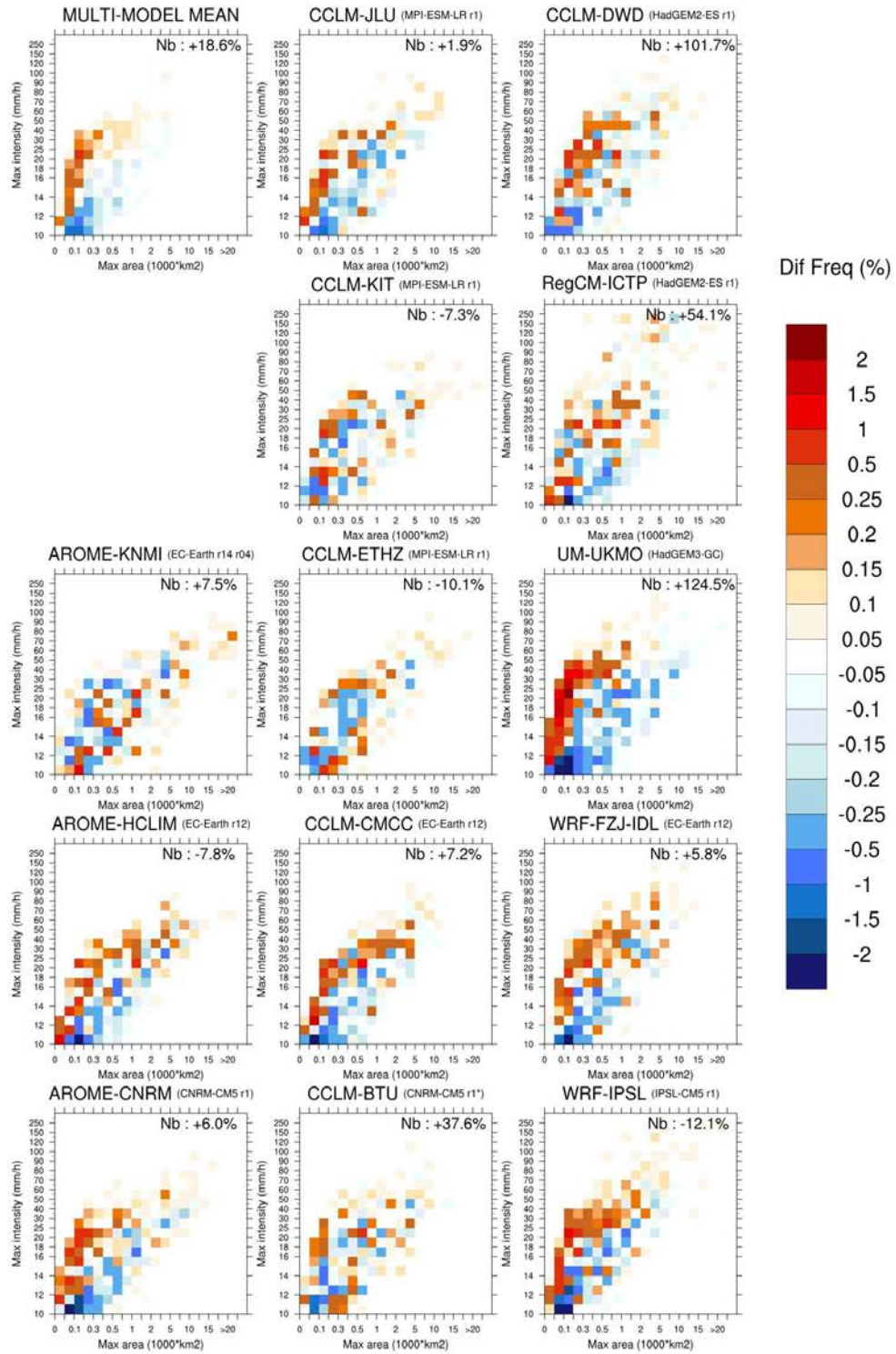


Figure S13. Same as Figure S12 but for Maximum Intensity Area Histogram (IAH).

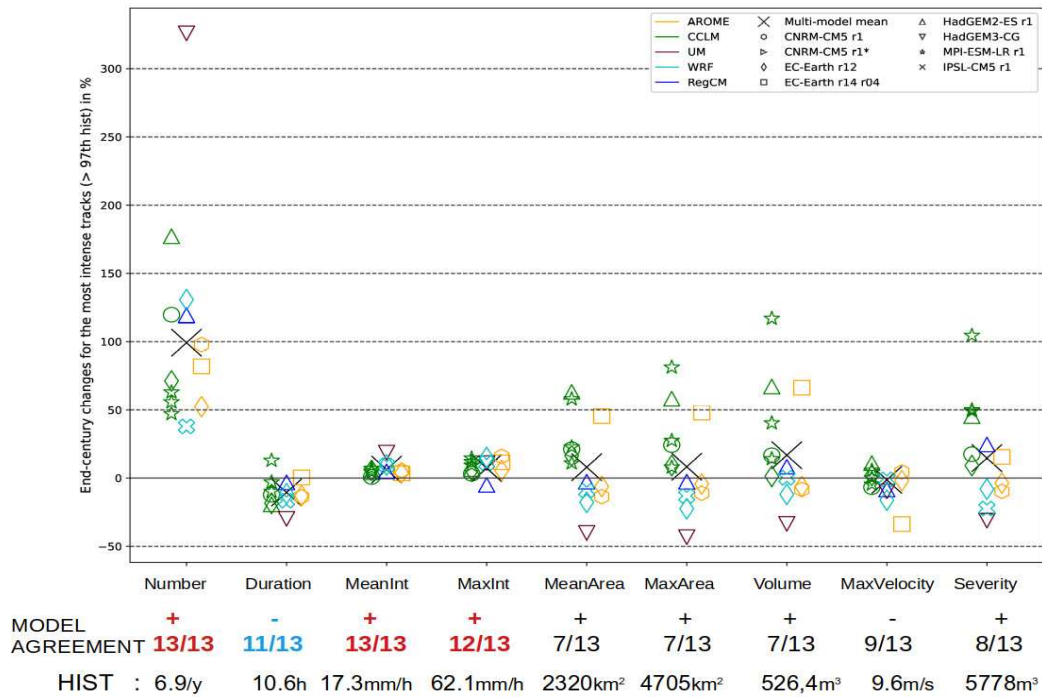


Figure S14. For the selection of tracks over the French Mediterranean area during SOND, only considering the most intense tracks i. e. those with maximum intensities above each simulation’s historical 97th percentile of maximum intensities : main characteristics’ differences (in %) between the end-century and the historical periods for the multi-model mean and the 13 CP-RCMs (one colour per family of CP-RCM and one symbol per driving GCM).

Table S2. Changes between end-century (2090-2099) and historical (1996-2005) periods for fall French Mediterranean HPEs: in mean 2m temperature averaged over the whole ALP-3 domain for SOND, in maximum intensity (MaxInt) with the 90% confidence interval given by a bootstrapping method, in MaxInt per warming degree, the 20-year return values of MaxInt inferred by a GPD fit with a 95% confidence interval for the two periods, the changes in 20-year MaxInt return value, in 20-year MaxInt return value per warming degree and comparison of the changes in 20-year MaxInt return value to the Clausius-Clapeyron rate

Simulation (Driving GCM)	ΔT_{ALP3}	Changes in MaxInt	Changes in MaxInt per warming degree	20-year MaxInt return value Historical	20-year MaxInt return value End-century	Changes in 20-year MaxInt return value	Changes in 20-year MaxInt per warming degree	Comparison to CC rate
CCLM-JLU (MPI-ESM-LR r1)	+3.7°C	+7.6% [+2;+14]	+2.1%/°C	104mm/h [85;125]	121mm/h [105;137]	+16.1%	+4.4%/°C	0.6CC
CCLM-KIT (MPI-ESM-LR r1)	+3.5°C	+7.3% [+3;+13]	+2.1%/°C	73mm/h [70;76]	142mm/h [101;184]	+95.3%	+27.2%/°C	3.9CC
CCLM-ETHZ (MPI-ESM-LR r1)	+3.3°C	+6.1% [+3;+9]	+1.8%/°C	85mm/h [77;93]	125mm/h [104;146]	+47.1%	+14.3%/°C	2.0CC
CCLM-DWD (HadGEM2-ES r1)	+5.9°C	+7.2% [+3;+17]	+1.2%/°C	90mm/h [87;94]	132mm/h [111;152]	+45.5%	+7.7%/°C	1.1CC
RegCM-ICTP (HadGEM2-ES r1)	+5.3°C	+10.8% [-4;+26]	+2.0%/°C	631mm/h [208;1054]	551mm/h [326;777]	-12.7%	-2.7%/°C	-0.3CC
UM-UKMO (HadGEM3-GC)	+6.7°C	+20.2% [+16;+25]	+3.0%/°C	105mm/h [89;120]	178mm/h [142;214]	+69.3%	+10.3%/°C	1.5CC
CCLM-CMCC (EC-Earth r12)	+3.8°C	+9.7% [+4;+15]	+2.6%/°C	84mm/h [76;92]	110mm/h [92;138]	+30.6%	+8.1%/°C	1.2CC
AROME-HCLIM (EC-Earth r12)	+3.7°C	+7.7% [+2;+12]	+2.1%/°C	88mm/h [74;103]	102mm/h [87;118]	+21.3%	+5.8%/°C	0.8CC
WRF-FZJ-IDL (EC-Earth r12)	+3.5°C	+16.9% [+11;+24)	+4.8%/°C	92mm/h [81;103]	159mm/h [126;192]	+73.3%	+20.9%/°C	3.0CC
AROME-KNMI (EC-Earth r14 r4)	+3.7°C	+2.9% [-2;+8]	+0.8%/°C	68mm/h [61;72]	93mm/h [82;104]	+36.1%	+9.8%/°C	1.4CC
AROME-CNRM (CNRM-CM5 r1)	+3.3°C	+10.5% [+6;+16]	+3.2%/°C	77mm/h [63;91]	123mm/h [97;149]	+60.6%	+18.4%/°C	2.6CC
CCLM-BTU (CNRM-CM5 r1*)	+3.4°C	+5.8% [+1;+12]	+1.7%/°C	107mm/h [89;126]	135mm/h [110;160]	+25.5%	+7.5%/°C	1.1CC
WRF-IPSL	+5.7°C	+12.1%	+2.1%/°C	148mm/h	243mm/h	+64.3%	+11.3%/°C	1.6CC

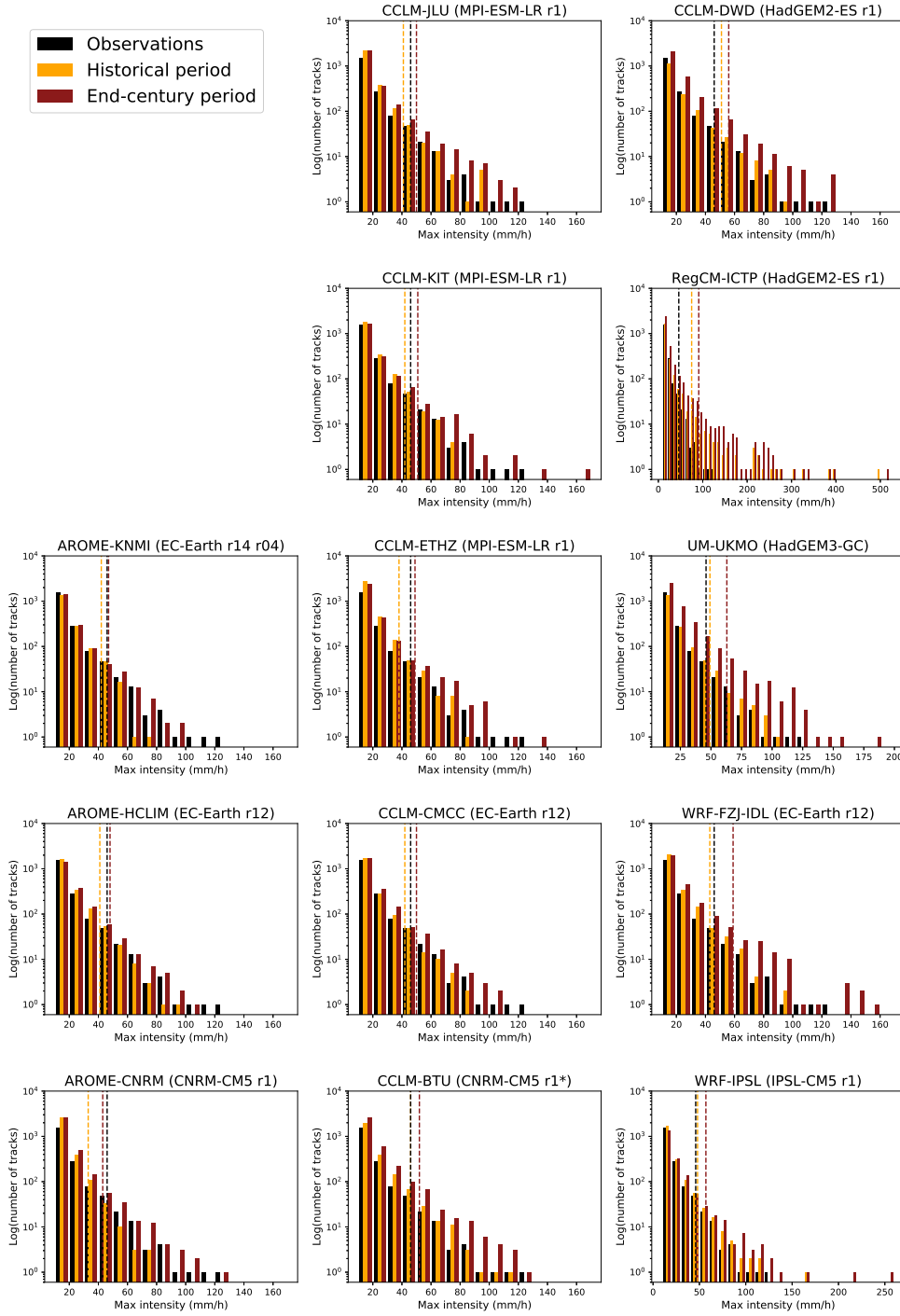


Figure S15. Distribution of maximum intensity for the observations (2001-2010) in black, the historical period (1996-2005) in orange and the end-century period (2090-2099, RCP8.5) in red for the 12 CP-RCMs with a logarithmic scale to highlight the distribution tails. Vertical dotted lines represent the 97th percentile of maximum intensity. Three subfigures (RegCM-ICTP, UM-UKMO and WRF-IPSL) have wider horizontal scales. We consider all tracks of cells above 10 mm/h occurring during days exceeding 100 mm/day in the French Mediterranean area during the extended fall (SOND).

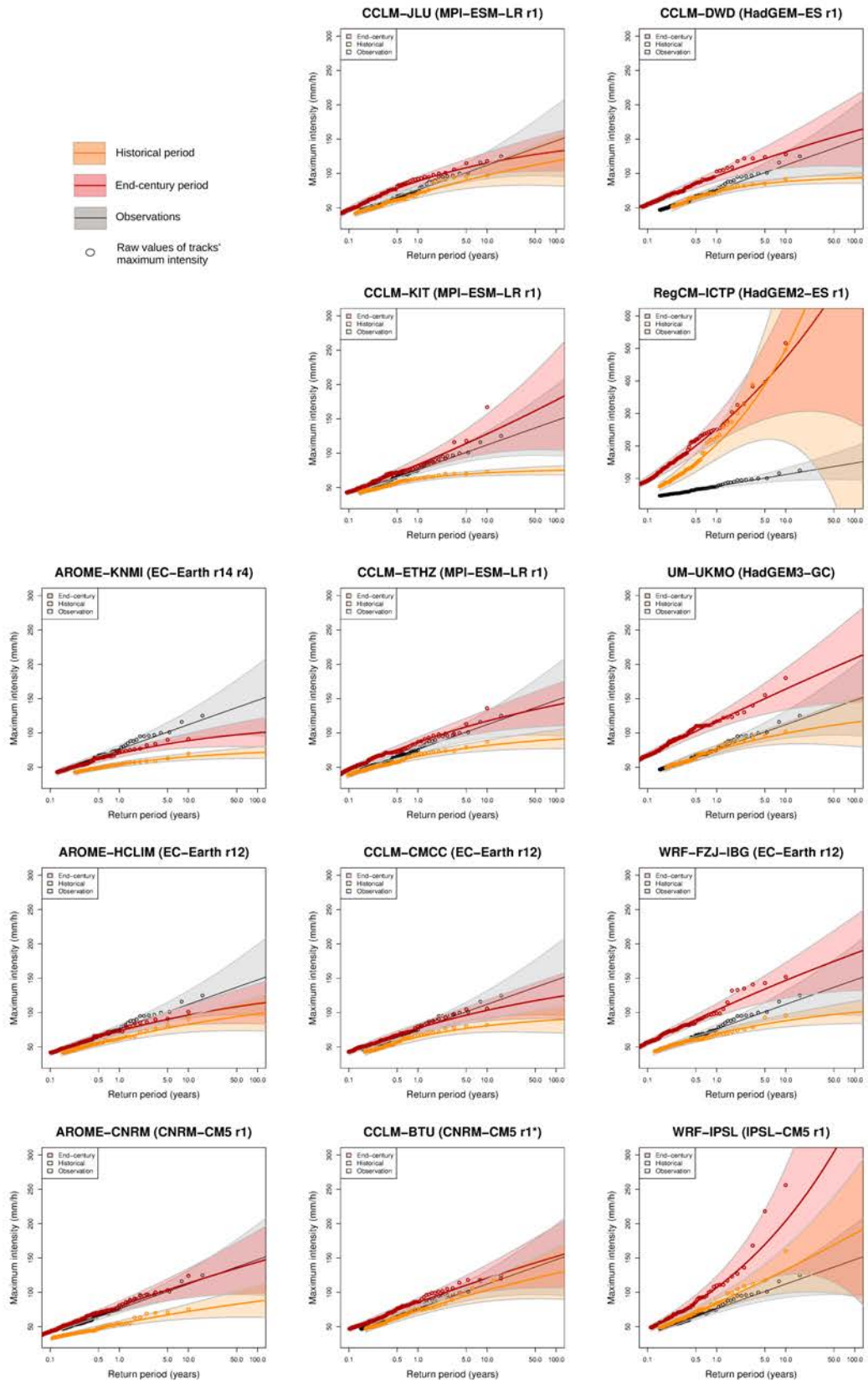


Figure S16. Maximum intensities return value plots using GPD for the observations (2001-2016) in black, the historical period (1996-2005) in orange and the end-century period (2090-2099, RCP8.5) in red (colored area for the 95% confidence interval) for the 13 CP-RCMs simulations. We consider tracks with maximum intensity above the historical 97th percentile of maximum intensities, selected among tracks of cells above 10 mm/h occurring during days exceeding 100 mm/day in the French Mediterranean area during the extended fall (SOND).

Text S3 : Mid-century period

Spatial distribution over the pan-Alpine domain

Looking at the middle of the century (cf. Figure S17) and comparing the results with those obtained at the end of the century, we also find an increase in the frequency of fall heavy precipitation, greater in the same areas, but with a change over land approximately twice as small (+3.4 and +1.5, respectively for the end and the mid-century). As well as at the end of the century, there are no areas affected by a decrease. The multi-model agreement is much weaker : 73% of land covered with model agreement above 67%, 34% of land with model agreement above 80% and only 15% of land with model agreement above 90%. The panel Figure S18 shows the diversity of changes, even if a similar behaviour is observed with the three CP-RCMs driven by MPI-ESM-LR r1 with the largest increases over land. Over the French Mediterranean, the simulations disagree on the change of frequency of heavy precipitation.

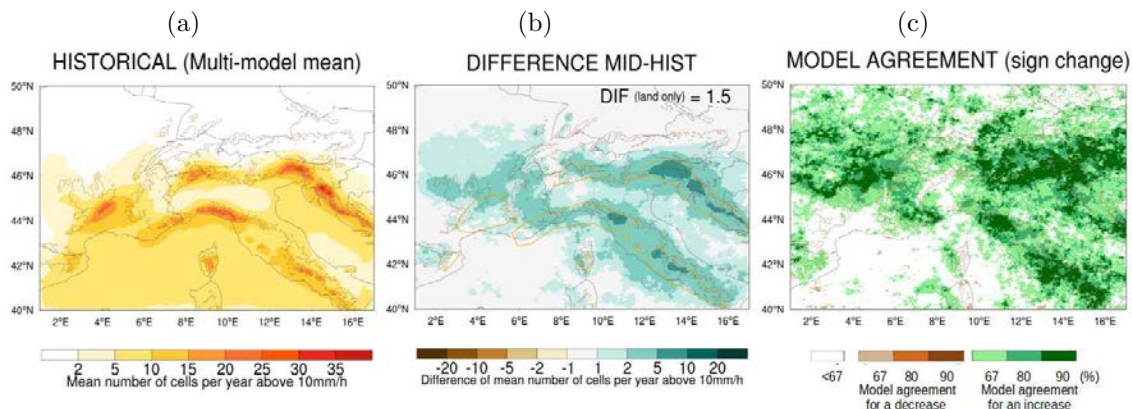


Figure S17. Same as Figure 1 but for the mid-century period (2041-2050, RCP8.5).

Focus on the French Mediterranean HPEs

We now focus on French Mediterranean HPEs (as defined in 2.2). Figure S19 (a) summarizes the mid-century changes, for the multi-model mean and for each simulation, for the main characteristics of the precipitating systems and indicates the significant sign changes (for an increase or a decrease) at the 90% confidence level thanks to a bootstrapping method described in Text S1. We first notice an increase in the multi-model mean number of tracks, slightly lower, but quite close to that of the end of the century (+15% against +19%). However, when considering each individual simulation ("Number") and comparing the changes to those expected at the end of the century (cf. Figure 2 a), some differences stand out : for example, the three models driven by MPI-ESM-LR r1, with no significant changes in the number of tracks at the end of the century, agree on an increase between +20% and +41% for the mid-century period (significant for CCLM-JLU). Some other simulations present the same behaviour with stronger increases in the number of tracks at mid-century such as AROME-CNRM or AROME-KNMI. These changes in the number of tracks are linked to changes in the number of days above 100mm/h ("Nb100"), a proxy of the number of days with large-scale favourable conditions for HPEs. However, except CCLM-JLU, the sign changes are not significant and acknowledging the high interannual variability of Mediterranean HPEs, the differences may be related to the internal variability of the simulations usually smoothed in long climate studies but still found here with short 10-year simulations.

Considering the other characteristics of French Mediterranean HPEs (cf. Figure S19 a), there is a low model agreement for the sign change in duration and propagation speed. Increases with large agreement among simulations are projected for mean intensities (ranging from -0 to +4% with an agreement of 12/13 simulations for an increase), maximum intensities (ranging from +1% to +10% with full agreement), mean and maximum areas (ranging from -13 to +12% and from -12 to +18% respectively, 11/13) that explain increases in volume (ranging from -10 to +52%, 11/13) and severity (ranging from -10 to +87%, 12/13). However, the values are lower than at the end of the century, with also lower number of simulations with significant sign changes. The UM-UKMO simulation again shows a different behaviour from the other simulations with more numerous, shorter and smaller convective systems and therefore smaller volumes. However, the UM-UKMO increases or decrease are not always statistically significant unlike the end of the century.

The changes in IDH and IAH distributions between mid-century and historical periods (cf. Figures S20 and S21) are even more patchy than in the end-century and not really informative when considering each simulation alone. UM-UKMO or CCLM-JLU are nearly the only ones to show a clear signal : an increase in frequency of intense, short and small events whatever the intensity for the UM-UKMO, and for intensity below 30mm/h for the CCLM-JLU simulation. However, the multi-model ensemble mean (cf. Figures S19 d,g) shows quite a good agreement for an increase in frequency of events for all durations and areas for maximum intensity higher than 30 mm/h. Below this intensity threshold, there is an increase in the frequency of events with short lifetime and small areas despite a weaker degree of agreement than at the end of the century.

Therefore, the conclusions on changes expected at the mid-century period for fall French Mediterranean precipitating events are close to those given for the end-of-century period, but with lower values and less statistical significance for the changes of the main characteristics and a stronger impact of the climate natural variability on the frequency change. 10-year simulations seem to be a limitation to assess accurately significant changes in extremes with high interannual variability, especially for the mid-century period with a lower signal-to-noise ratio than the end-century.

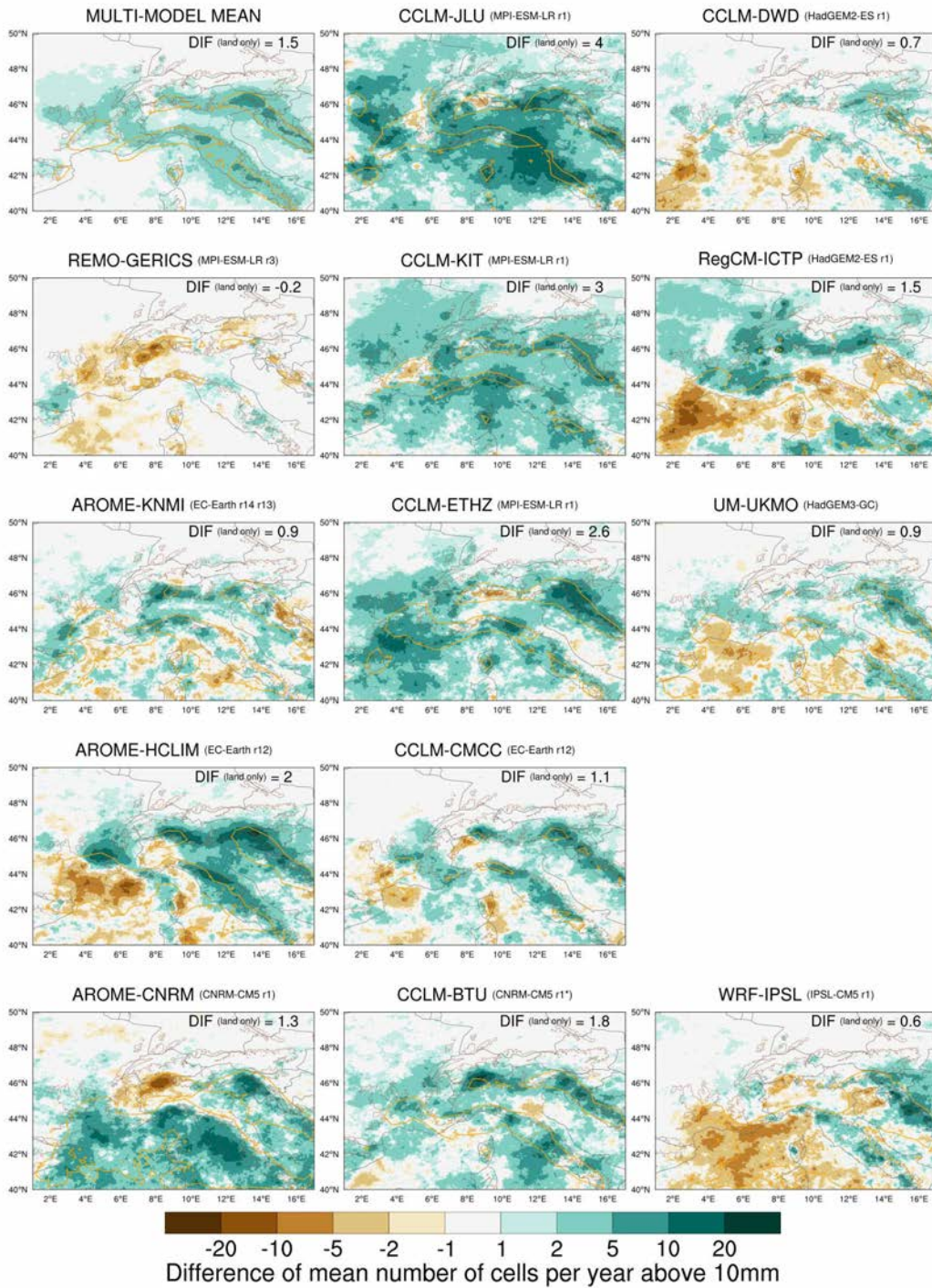


Figure S18. Same as Figure S11 but for the mid-century period (2041-2050, RCP8.5).

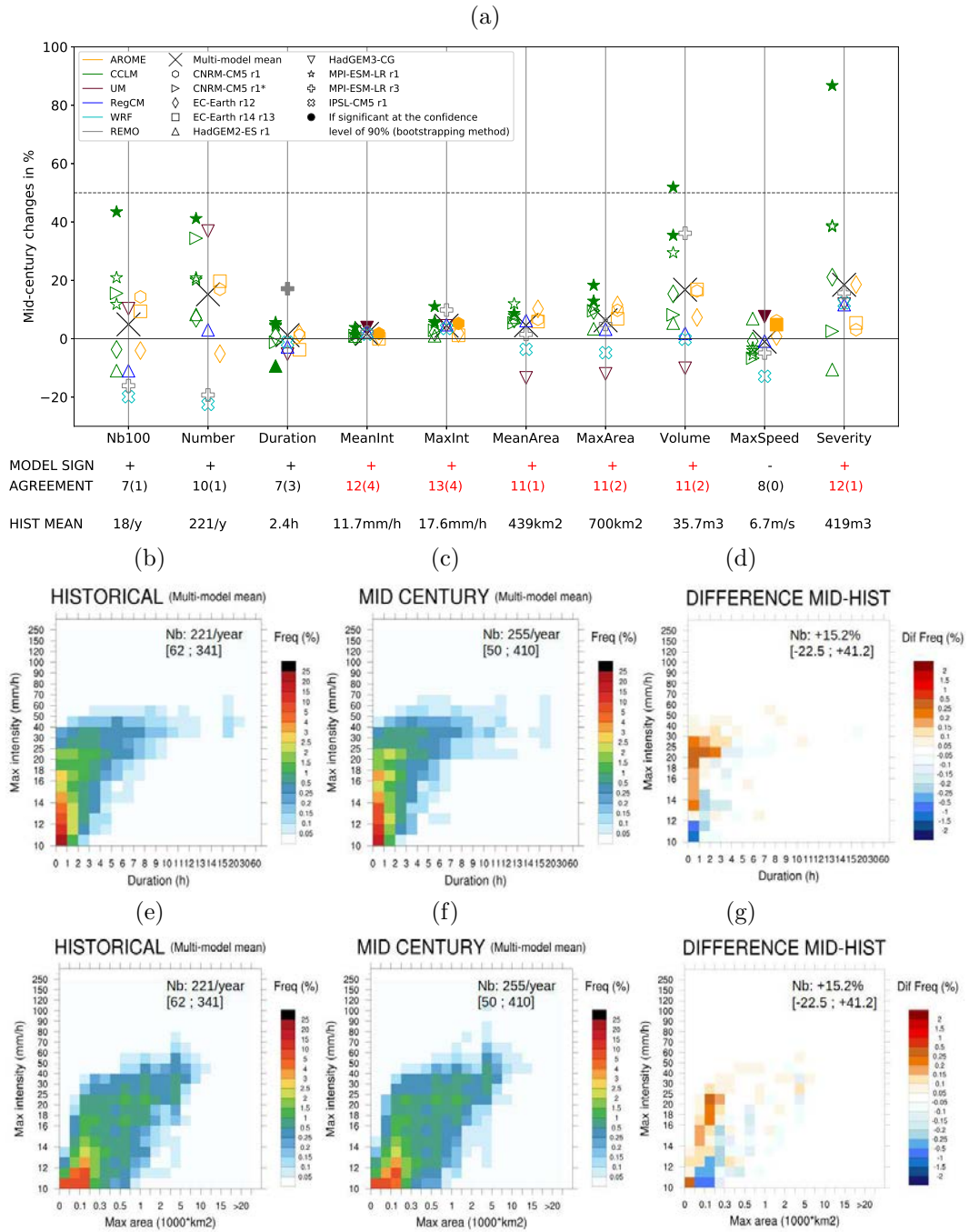


Figure S19. Same as Figure 2 but for the mid-century period (2041-2050, RCP8.5), but without the plot of 20-year maximum intensity return values.

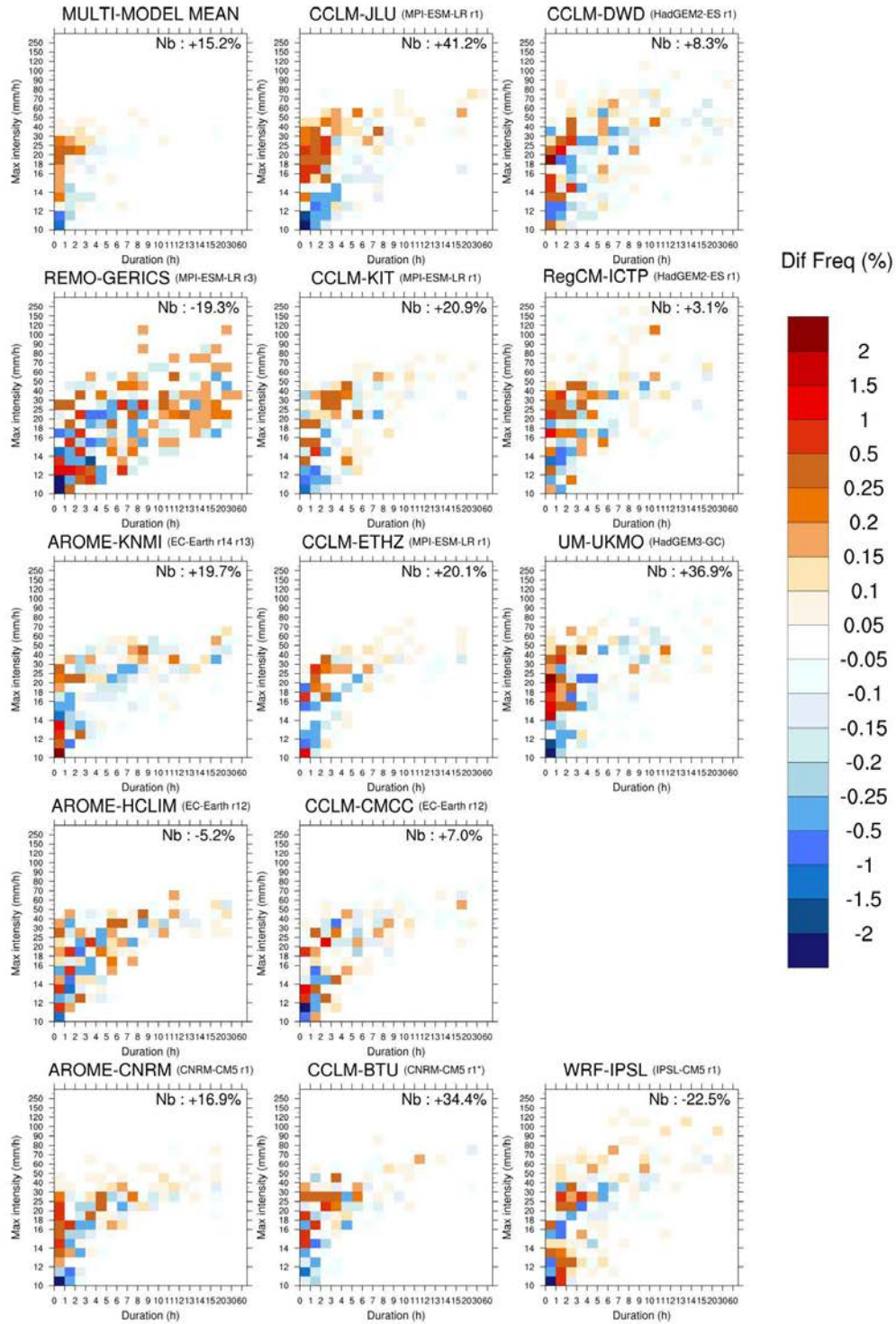


Figure S20. Same as Figure S12 but for the mid-century period (2041-2050, RCP8.5).

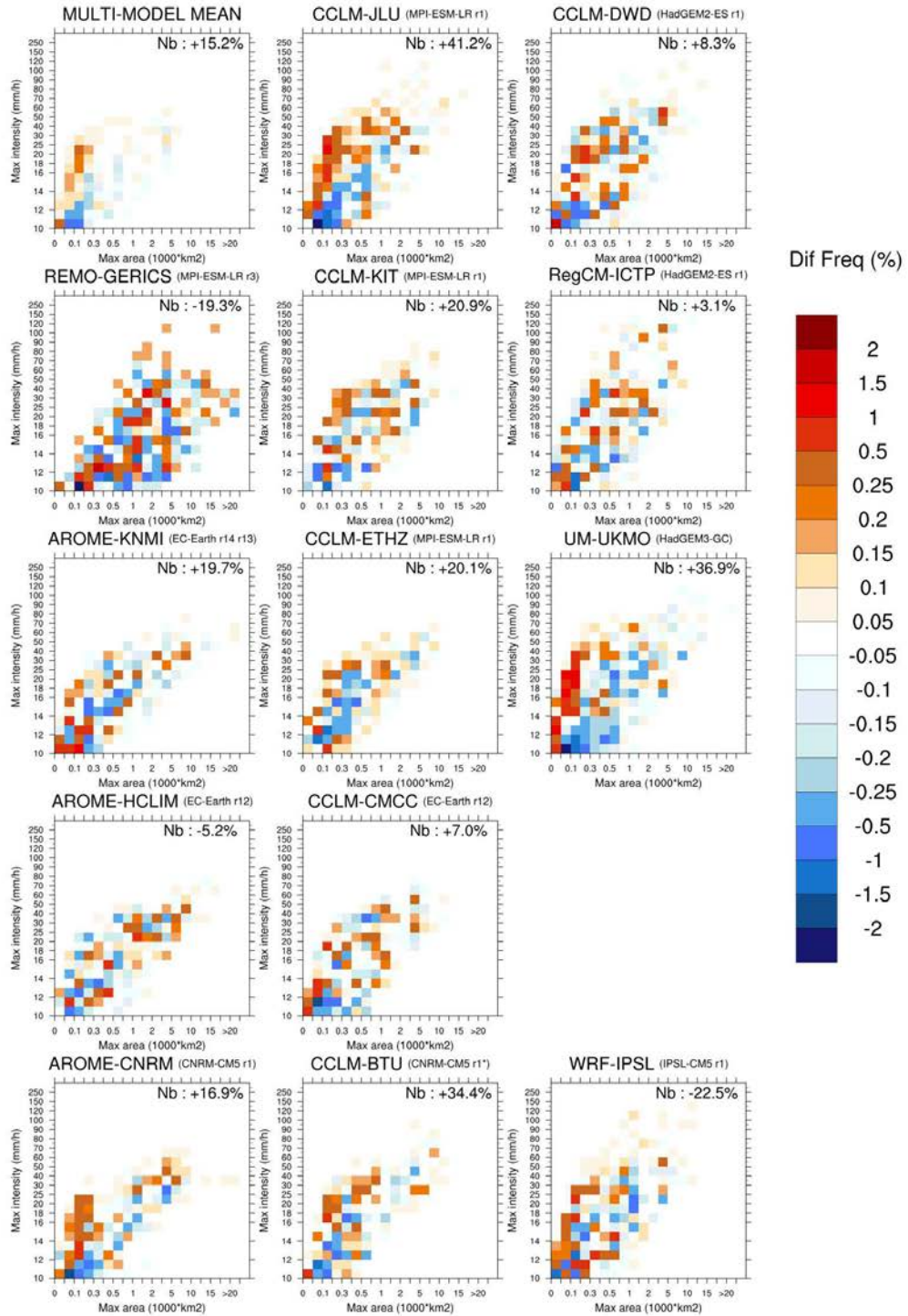


Figure S21. Same as Figure S13 but for the mid-century period (2041-2050, RCP8.5).

References

- Adinolfi, M., Raffa, M., Reder, A., & Mercogliano, P. (2021). Evaluation and expected changes of summer precipitation at convection permitting scale with COSMO-CLM over alpine space. *Atmosphere*, *12*(1), 54. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/atmos12010054>
- Baldauf, M., Seifert, A., Förstner, J., Majewski, D., Raschendorfer, M., & Reinhardt, T. (2011). Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: Description and sensitivities. *Monthly Weather Review*, *139*(12), 3887–3905. Retrieved from <https://doi.org/10.1175/MWR-D-10-05013.1>
- Ban, N., Caillaud, C., Coppola, E., Pichelli, E., Sobolowski, S., Adinolfi, M., . . . others (2021). The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution, part I: Evaluation of precipitation. *Climate Dynamics*. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05708-w>
- Belušić, D., de Vries, H., Dobler, A., Landgren, O., Lind, P., Lindstedt, D., . . . others (2020). HCLIM38: A flexible regional climate model applicable for different climate zones from coarse to convection permitting scales. *Geosci. Model Dev.* Retrieved from <https://doi.org/10.5194/gmd-13-1311-2020>
- Brousseau, P., Seity, Y., Ricard, D., & Léger, J. (2016). Improvement of the forecast of convective activity from the AROME-France system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *142*(699), 2231–2243. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/qj.2822>
- Caillaud, C., Somot, S., Alias, A., Bernard-Bouissières, I., Fumière, Q., Laurantin, O., . . . Ducrocq, V. (2021). Modelling mediterranean heavy precipitation events at climate scale: an object-oriented evaluation of the CNRM-AROME convection-permitting regional climate model. *Climate Dynamics*, 1–36. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05558-y>
- Chan, S. C., Kendon, E. J., Berthou, S., Fosser, G., Lewis, E., & Fowler, H. J. (2020). Europe-wide precipitation projections at convection permitting scale with the Unified Model. *Climate Dynamics*, *55*, 409–428. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05192-8>
- Coles, S., Bawa, J., Trenner, L., & Dorazio, P. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values* (Vol. 208). Springer. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3675-0>
- Coppola, E., Sobolowski, S., Pichelli, E., Raffaele, F., Ahrens, B., Anders, I., . . . others (2020). A first-of-its-kind multi-model convection permitting ensemble for investigating convective phenomena over Europe and the Mediterranean. *Climate Dynamics*, *55*, 3–34. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4521-8>
- Coppola, E., Stocchi, P., Pichelli, E., Torres Alavez, J. A., Glazer, R., Giuliani, G., . . . Giorgi, F. (2021). Non-Hydrostatic RegCM4 (RegCM4-NH): model description and case studies over multiple domains. *Geoscientific Model Development*, *14*(12), 7705–7723. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/gmd-14-7705-2021>
- de Vries, H., Lenderink, G., van der Wiel, K., & van Meijgaard, E. (2022). Quantifying the role of the large-scale circulation on European summer precipitation change. *Climate Dynamics*, *59*(9-10), 2871–2886. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06250-z>
- Dufresne, J.-L., Foujols, M.-A., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., . . . others (2013). Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. *Climate dynamics*, *40*, 2123–2165. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1>
- Fantini, A. (2019). *Climate change impact on flood hazard over Italy*. (Unpublished doctoral dissertation). Università degli Studi di Trieste - URL <http://hdl.handle.net/11368/2940009>.

- Fumière, Q., Déqué, M., Nuissier, O., Somot, S., Alias, A., Caillaud, C., ... Seity, Y. (2020). Extreme rainfall in Mediterranean France during the fall: added value of the CNRM-AROME Convection-Permitting Regional Climate Model. *Climate Dynamics*, *55*, 77–91. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04898-8>
- Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., Sylla, M., Bi, X., ... others (2012). RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research*, *52*, 7–29. Retrieved from <https://doi.org/10.3354/cr01018>
- Hazeleger, W., Wang, X., Severijns, C., Ștefănescu, S., Bintanja, R., Sterl, A., ... others (2012). EC-Earth V2. 2: description and validation of a new seamless earth system prediction model. *Climate dynamics*, *39*, 2611–2629. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1228-5>
- Hirt, M., Craig, G. C., Schäfer, S. A., Savre, J., & Heinze, R. (2020). Cold-pool-driven convective initiation: Using causal graph analysis to determine what convection-permitting models are missing. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *146*(730), 2205–2227. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/qj.3788>
- Jacob, D., Elizalde, A., Haensler, A., Hagemann, S., Kumar, P., Podzun, R., ... others (2012). Assessing the transferability of the regional climate model REMO to different coordinated regional climate downscaling experiment (CORDEX) regions. *Atmosphere*, *3*(1), 181–199. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/atmos3010181>
- Jones, C., Hughes, J., Bellouin, N., Hardiman, S., Jones, G., Knight, J., ... others (2011). The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geoscientific Model Development*, *4*(3), 543–570. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/gmd-4-543-2011>
- Keuler, K., Radtke, K., Kotlarski, S., & Lüthi, D. (2016). Regional climate change over Europe in COSMO-CLM: Influence of emission scenario and driving global model. *Meteorologische Zeitschrift*, *25*(2), 121–136. Retrieved from <https://doi.org/10.1127/metz/2016/0662>
- Leutwyler, D., Lüthi, D., Ban, N., Fuhrer, O., & Schär, C. (2017). Evaluation of the convection-resolving climate modeling approach on continental scales. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *122*(10), 5237–5258. doi: 10.1002/2016JD026013
- Marsland, S. J., Haak, H., Jungclaus, J. H., Latif, M., & Röske, F. (2003). The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates. *Ocean modelling*, *5*(2), 91–127. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S1463-5003\(02\)00015-X](https://doi.org/10.1016/S1463-5003(02)00015-X)
- Mizielinski, M., Roberts, M., Vidale, P., Schiemann, R., Demory, M.-E., Strachan, J., ... others (2014). High-resolution global climate modelling: the UPSCALE project, a large-simulation campaign. *Geoscientific Model Development*, *7*(4), 1629–1640. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1629-2014>
- Morel, C., & Senesi, S. (2002). A climatology of mesoscale convective systems over Europe using satellite infrared imagery. I: Methodology. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*, *128*(584), 1953–1971. doi: 10.1256/003590002320603485
- Müller, S. K., Caillaud, C., Chan, S., de Vries, H., Bastin, S., Berthou, S., ... others (2022). Evaluation of Alpine-Mediterranean precipitation events in convection-permitting regional climate models using a set of tracking algorithms. *Climate Dynamics*, 1–19. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06555-z>
- Nabat, P., Somot, S., Cassou, C., Mallet, M., Michou, M., Bouniol, D., ... Saint-Martin, D. (2020). Modulation of radiative aerosols effects by atmospheric

- circulation over the Euro-Mediterranean region. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(14), 8315–8349. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/acp-20-8315-2020>
- Neff, E. L. (1977). How much rain does a rain gage gage? *Journal of Hydrology*, 35(3-4), 213–220. doi: 10.1016/0022-1694(77)90001-4
- Powers, J. G., Klemp, J. B., Skamarock, W. C., Davis, C. A., Dudhia, J., Gill, D. O., ... others (2017). The weather research and forecasting model: Overview, system efforts, and future directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8), 1717–1737. Retrieved from <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00308.1>
- Raddatz, T., Reick, C., Knorr, W., Kattge, J., Roeckner, E., Schnur, R., ... Jungclaus, J. (2007). Will the tropical land biosphere dominate the climate–carbon cycle feedback during the twenty-first century? *Climate dynamics*, 29, 565–574. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0247-8>
- Rajczak, J., & Schär, C. (2017). Projections of future precipitation extremes over Europe: A multimodel assessment of climate simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(20), 10–773. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/2017JD027176>
- Rockel, B., Will, A., & Hense, A. (2008). The regional climate model COSMO–CLM (CCLM). *Meteorologische Zeitschrift*, 17(4), 347.
- Skamarock, W. (2008). A description of the advanced research WRF version 3. *Tech. Note*, 1–96. doi: 10.5065/D68S4MVH
- Stocchi, P., Pichelli, E., Torres Alavez, J. A., Coppola, E., Giuliani, G., & Giorgi, F. (2022). Non-Hydrostatic RegCM4 (RegCM4-NH): Evaluation of Precipitation Statistics at the Convection-Permitting Scale over Different Domains. *Atmosphere*, 13(6), 861. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/atmos13060861>
- Tabary, P., Dupuy, P., Lhenaff, G., Gueguen, C., Moulin, L., Laurantin, O., ... Soubeyroux, J.-M. (2012). A 10-year (1997–2006) reanalysis of Quantitative Precipitation Estimation over France: methodology and first results. *IAHS-AISH publication*, 255–260.
- Tramblay, Y., & Somot, S. (2018). Future evolution of extreme precipitation in the Mediterranean. *Climatic Change*, 151(2), 289–302. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2300-5>
- van Meijgaard, E., Van Ulft, L., Lenderink, G., De Roode, S., Wipfler, E. L., Boers, R., & van Timmermans, R. (2012). *Refinement and application of a regional atmospheric model for climate scenario calculations of Western Europe* (No. KVR 054/12). KvR.
- van Meijgaard, E., Van Ulft, L., Van de Berg, W., Bosveld, F., Van den Hurk, B., Lenderink, G., & Siebesma, A. (2008). *The KNMI regional atmospheric climate model RACMO, version 2.1*. KNMI De Bilt, The Netherlands.
- Vautard, R., Kadyrov, N., Iles, C., Boberg, F., Buonomo, E., Bülow, K., ... others (2021). Evaluation of the large EURO-CORDEX regional climate model ensemble. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(17), e2019JD032344. Retrieved from <https://doi.org/10.1029/2019JD032344>
- Voldoire, A., Sanchez-Gomez, E., y Méliá, D. S., Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., ... others (2013). The CNRM-CM5. 1 global climate model: description and basic evaluation. *Climate Dynamics*, 40(9-10), 2091–2121. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1259-y>
- Yang, D., Ishida, S., Goodison, B. E., & Gunther, T. (1999). Bias correction of daily precipitation measurements for Greenland. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D6), 6171–6181. Retrieved from <https://doi.org/10.1029/1998JD200110>

3032 **4.3 Synthèse de l'évolution future des épisodes méditerranéens par un ensemble de CP-RCMs**

3033

3034 **4.3.1 Points forts**

3035 La comparaison des simulations historiques aux observations permet tout d'abord de
3036 confirmer la bonne performance des CP-RCMs et leur valeur ajoutée pour les statistiques
3037 eulériennes, mais aussi lagrangiennes. Ainsi, il a été montré que, même lorsque les condi-
3038 tions aux limites proviennent de simulations historiques de GCMs, les CP-RCMs continuent
3039 d'apporter une nette valeur ajoutée pour les extrêmes de précipitation de l'automne par
3040 rapport aux RCMs et sont capables de représenter correctement les principales caractéris-
3041 tiques des systèmes fortement précipitants, en particulier ceux du pourtour méditerranéen
3042 français.

3043 De plus, il est possible ici de comparer l'évaluation lagrangienne de ces simulations histo-
3044 riques forcées par des GCMs, à l'évaluation des simulations d'évaluation forcées au bord par
3045 la réanalyse ERA-Interim, présentée au chapitre 3. Pour rappel, exceptée une simulation
3046 (CCLM-GUF en évaluation et CCLM-DWD en historique), ces deux ensembles sont consti-
3047 tués des mêmes CP-RCMs. Or les conclusions qui avaient été faites pour les simulations
3048 d'évaluation sont quasiment inchangées lorsque l'on s'intéresse aux simulations historiques.
3049 Ainsi, sur l'ensemble du domaine pan-alpin couvert par les observations, le positionnement
3050 des systèmes supérieurs à 10 mm/h et les biais mis en évidence sont peu différents pour
3051 les moyennes des deux ensembles, mais également pour la plupart des simulations. On
3052 note toutefois quelques exceptions comme la simulation historique de CCLM-JLU (forcé
3053 directement par le GCM) qui présente des biais plus forts que la simulation d'évaluation
3054 (forçage direct par ERA-Interim). La simulation historique de WRF-IPSL est aussi plus
3055 proche des observations, alors qu'une forte surestimation avait été mise en évidence pour la
3056 simulation d'évaluation, mais un changement de version du modèle a encore été fait entre
3057 les deux simulations. En particulier sur le pourtour méditerranéen français, les ordres de
3058 grandeur des biais entre les deux ensembles de simulations sont très proches (cf. Figure 4.4
3059 qui reprend les figures de comparaison aux observations pour les ensembles de simulations
3060 d'évaluation et historiques). De même, les biais plus marqués pour certains paramètres mis
3061 en évidence pour certaines simulations d'évaluation, comme par exemple la surestimation
3062 des surfaces par les simulations d'AROME, RegCM et surtout REMO, sont les mêmes pour
3063 les simulations historiques. Alors que l'on aurait pu s'attendre à des différences plus impor-
3064 tantes quand les simulations ne sont plus forcées par les réanalyses, on constate également
3065 peu de différences significatives pour le nombre de systèmes. Ainsi, même si les écarts aux
3066 observations sont généralement plus importants pour les simulations historiques que pour
3067 les simulations d'évaluation, on obtient un nombre comparable de jours supérieurs à 100,
3068 proxy du nombre de jours avec des situations de grande échelle favorables. Cela tendrait
3069 à montrer que l'ensemble de GCMs choisis pour forcer les CP-RCMs se comportent bien
3070 en climat présent pour représenter la fréquence des situations de grande échelle favorables
3071 aux épisodes méditerranéens, mais cette hypothèse devrait être confirmée par une étude
3072 en régimes de temps appliquée à cet ensemble de GCMs. Concernant les systèmes les plus

3073 intenses, le comportement et les biais mis en évidence sont également proches pour les deux
 3074 ensembles de simulations d'évaluation et historiques.

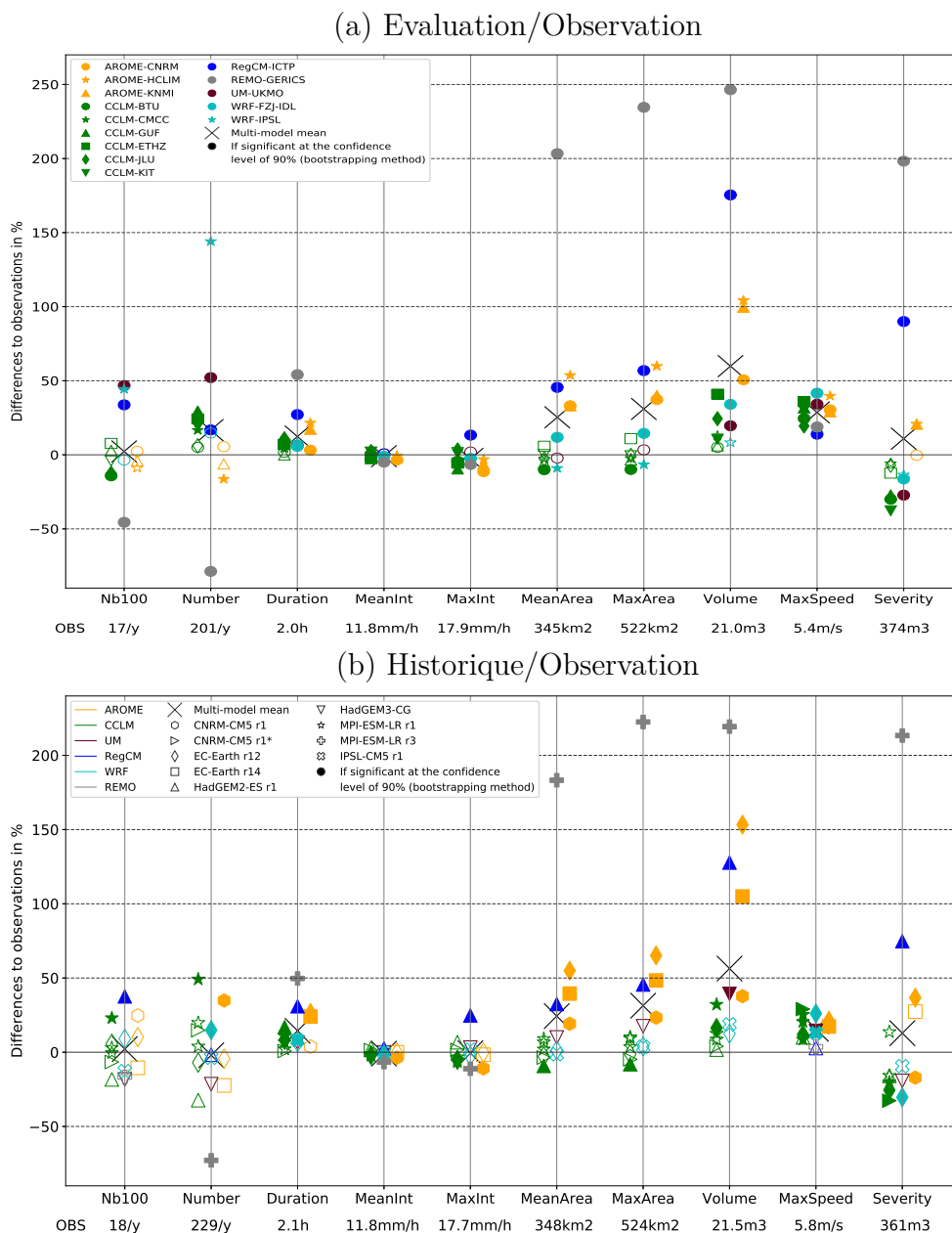


FIGURE 4.4 – Différences relatives des caractéristiques (en %) entre les simulations d'évaluation et les observations (2000-2009) pour (a) et entre pour les simulations historiques (1996-2005) et les observations (2001-2016) pour (b) pour la moyenne multi-modèle et les 14 CP-RCMs. On retrouve la même couleur par famille de CP-RCM pour les deux figures, mais les symboles différent : un symbole par CP-RCM pour (a) et un symbole par GCM pour (b)

3075 Cette comparaison des deux ensembles de simulations montrent donc que le comporte-
 3076 ment et les biais mis en évidence pour représenter les systèmes fortement précipitants de
 3077 l'automne dépendent peu du forçage au bord dans la gamme des modèles CMIP5 consi-
 3078 dérés dans cette étude, mais seraient donc des biais intrinsèques au CP-RCM et peut-être

3079 également à la famille de CP-RCM.

3080 Malgré quelques imperfections qui seront listées par la suite, l'ensemble de simulations
3081 de CP-RCMs du FPS Convection sur le domaine pan-alpin, associé à une approche la-
3082 grangienne, constitue une réelle opportunité pour étudier l'évolution future des épisodes
3083 méditerranéens. La combinaison de ces deux approches, ensembliste et objet, permet, en
3084 effet, de mettre en évidence quelques résultats robustes pour la réponse de ces événements
3085 au changement climatique :

- 3086 — Toutes les simulations s'accordent sur une augmentation de la fréquence des systèmes
3087 fortement précipitants dans une grande partie du domaine pan-alpin, en particulier
3088 du centre de l'Italie au nord des Balkans. Cette augmentation de fréquence s'accom-
3089 pagne d'une extension substantielle des zones touchées par les systèmes fortement
3090 précipitants de l'automne qui correspond à un doublement de ces zones pour la fin
3091 de siècle et le domaine pan-alpin ;
- 3092 — Il n'y a pas de réponse claire pour le changement de fréquence sur certaines parties
3093 du domaine, et en particulier sur le sud-est de la France ;
- 3094 — L'influence du GCM forceur qui pilote les conditions de grande échelle favorables à
3095 la survenue de ces événements semble dominante pour les changements de fréquence ;
- 3096 — Sur le pourtour méditerranéen français, l'ensemble de CP-RCMs confirme l'augmen-
3097 tation d'intensité des systèmes fortement précipitants de l'automne déjà suggérée
3098 par les études précédentes avec des RCMs ou des GCMs, avec un accord notable de
3099 toutes les simulations pour une augmentation des intensités moyennes et maximales
3100 en fin de siècle. En accord également avec plusieurs études passées (John et al, 2022;
3101 Coppola et al, 2021a; Trambly and Somot, 2018), les niveaux d'augmentation sont
3102 inférieurs au taux de Clausius-Clapeyron, sauf si l'on s'intéresse aux queues de dis-
3103 tribution des intensités maximales avec des valeurs de durée de retour de vingt ans
3104 jusqu'à quatre fois supérieures au taux de Clausius-Clapeyron ;
- 3105 — L'approche objet permet également d'ajouter de nouvelles informations sur les sys-
3106 tèmes convectifs futurs : alors que les changements attendus sont faibles et non signi-
3107 ficatifs pour les durées et les vitesses de propagation, une augmentation des surfaces
3108 et des volumes est projetée avec un bon accord parmi les simulations ;
- 3109 — Une large gamme de changements possibles est proposée dans les propriétés des
3110 systèmes fortement précipitants suivant les simulations, en particulier pour les évé-
3111 nements les plus intenses. Une simulation propose des changements dans les caracté-
3112 ristiques des systèmes convectifs futurs différents de ceux proposés par les autres
3113 simulations. Les différents changements mis en évidence ne peuvent pas être faci-
3114 lement expliqués par le choix du CP-RCM, du GCM forceur ou par le niveau de
3115 réchauffement régional correspondant.

3116 En parallèle de cette thèse, Sebastian Müller (ICTP) a également appliqué l'algorithme
3117 de tracking MODE à dix simulations historiques et scénarios de l'ensemble du FPS Convec-
3118 tion (dont les simulations de AROME-CNRM) pour étudier la réponse au changement cli-
3119 matique des événements fortement précipitants de la zone pan-alpine (Müller et al, 2023).

3120 Les objectifs de cette étude sont proches de ceux de ce chapitre de ma thèse, mais avec une
3121 visée plus large car toutes les saisons et tous les systèmes fortement précipitants, et non
3122 seulement les épisodes méditerranéens, sont inclus, comme par exemple la convection oro-
3123 graphique ou les systèmes convectifs de l'été. L'ensemble comprend les mêmes simulations
3124 que celles de mon étude, exceptées celles de REMO-GERICS, CCLM-BTU, WRF-IPSL
3125 et WRF-FZJ-IDL. Les résultats portent essentiellement sur la moyenne de l'ensemble, et
3126 la possible dispersion au sein de cet ensemble est malheureusement peu analysée. Cette
3127 étude indique, pour la fin de siècle et selon le scénario RCP8.5, en moyenne sur l'année et
3128 sur le domaine pan-alpin, que les événements fortement précipitants seront plus fréquents
3129 (+15%), se propageront plus loin et plus vite, dureront plus longtemps (+5%), leur sur-
3130 face augmentera (+15%), ainsi que leur volume de précipitation (+35%), leurs intensités
3131 maximales (+13%) et leur sévérité (+20%). Müller et al (2023) en donne également une dé-
3132 clinaison par sous-zone géographique et par saison. Pour la zone Sud France la plus proche
3133 de ma région d'intérêt et l'automne (SON), la fréquence augmenterait de +7%, l'intensité
3134 de +14%, la sévérité de +13% et le volume de +21% (non significatif pour ce dernier).
3135 Malgré les différences d'algorithme, de sélection des systèmes, de nombres de simulations
3136 étudiées et d'extension de la saison d'automne, les changements trouvés sont de même
3137 signe que les miens, ce qui conforte la plupart de mes conclusions, au moins sur le plan
3138 qualitatif. Toutefois, comme Müller et al (2023) se focalisent sur la moyenne de l'ensemble,
3139 la question de la robustesse des résultats est peu abordée et cela peut modifier certaines
3140 conclusions tirées : par exemple, si l'on s'intéresse au changement de fréquence sur le sud-
3141 est de la France, j'obtiens également une augmentation du nombre de systèmes fortement
3142 précipitants pour la moyenne multi-modèle, mais comme elle résulte de l'augmentation de
3143 trois seules simulations qui présentent une augmentation forte et significative alors que
3144 les différences ne sont pas significatives pour les onze autres simulations, ma conclusion
3145 consiste à ne pas pouvoir donner de réponse claire pour le changement sur la fréquence,
3146 contrairement à Müller et al (2023).

3147 4.3.2 Limitations

3148 Si ce problème a déjà été signalé pour l'évaluation des simulations, la courte durée
3149 des simulations (dix ans) est problématique pour obtenir des résultats robustes dans la
3150 réponse des épisodes méditerranéens au changement climatique et peut expliquer, au moins
3151 en partie, certaines incertitudes mises en évidence. En effet, ces événements présentent
3152 une forte variabilité interannuelle et le choix des périodes de dix ans peut donc avoir un
3153 impact sur les résultats obtenus (Jain et al, 2023), en particulier pour les systèmes les
3154 plus extrêmes. Cela se traduit par de larges gammes de changements possibles dans les
3155 propriétés des systèmes, et en particulier pour les événements les plus intenses, donc les
3156 plus rares. Par exemple, les intensités maximales de durée de retour de vingt ans en futur
3157 présentent de larges intervalles de confiance pour chaque simulation et des valeurs très
3158 différentes quand on compare les simulations entre elles. La courte durée des simulations
3159 ne permet sans doute pas de s'abstraire de la variabilité interne des simulations. Cette
3160 variabilité peut être illustrée par les simulations forcées par le GCM MPI-ESM-LR r1

3161 qui ne présentent pas de changement significatif de fréquence en fin de siècle, mais une
3162 augmentation de +20 à +41% en milieu de siècle. Une étude sur l'ensemble du 21e siècle
3163 et non limitée à des périodes de dix ans permettrait de déterminer la part de variabilité
3164 interne et celle d'éventuels changements de circulation de grande échelle. Cet ensemble ne
3165 permet donc sans doute pas une estimation robuste du signal forcé, mais explore plutôt un
3166 ensemble de possibles en climat plus chaud.

3167 De même, des simulations sur des domaines plus vastes permettraient aux CP-RCMs
3168 d'exprimer plus largement leur propre variabilité interne, de modifier potentiellement la
3169 circulation à plus grande échelle et donc de conduire à un rapport signal/bruit différent. La
3170 seule simulation réalisée sur un large domaine pan-européen, celle de UM-UKMO, est celle
3171 qui projette un changement différent de toutes les autres simulations dans la convection,
3172 avec des systèmes plus intermittents et plus intenses. Comme cette différence de domaine
3173 n'est pas la seule différence de protocole avec les autres simulations, il n'est pas possible de
3174 conclure à l'effet potentiel de la taille du domaine, mais cela mériterait d'être investigué.

3175 De plus, la taille restreinte de l'ensemble (moins de 15 simulations) constitue un autre
3176 facteur limitant pour la robustesse des résultats.

3177 On retrouve également des limitations liées à la construction de l'ensemble de CP-
3178 RCMs du FPS Convection qui s'ajoutent au nombre différent de simulation par famille
3179 de CP-RCM ou au protocole de couplage. En effet, la coordination en ce qui concerne
3180 la stratégie de forçage et le choix des GCMs a été assez limitée. Le choix des GCMs ne
3181 s'est pas fait dans le but de remplir au mieux la matrice GCM/CP-RCM et d'explorer les
3182 incertitudes, mais il a été fait, compte-tenu du coût des simulations, suivant les besoins
3183 et contraintes de chaque institut. Il s'agit donc d'un "ensemble d'opportunité" avec, par
3184 exemple, plusieurs simulations CCLM forcées par le même GCM MPI-ESM-LR r1. La
3185 simulation qui présente le plus de différences dans le protocole de forçage est celle de
3186 UM-UKMO avec non seulement un domaine plus grand, mais aussi un forçage direct par
3187 un GCM haute résolution (25 km) avec des SSTs prescrites. Ces différences rendent plus
3188 difficile l'interprétation des résultats et limitent également leur représentativité.

3189 L'interprétation des résultats est également difficile en raison du choix de périodes
3190 temporelles fixes, préférées à des niveaux de réchauffement qui sont maintenant privilé-
3191 giés dans les études récentes. Or les niveaux de réchauffement diffèrent fortement entre les
3192 modèles : entre +3.3 et +6.7°C entre les périodes historique et fin de siècle pour le réchauf-
3193 fement régional des CP-RCMs calculé sur le domaine pan-alpin et pour la saison SOND.
3194 Pour s'affranchir de ces différences, certains résultats ont été donc donnés par degré de
3195 réchauffement régional. Une relation entre le niveau de réchauffement et le changement des
3196 caractéristiques des systèmes précipitants, comme par exemple le degré d'intensification, a
3197 été recherchée, mais n'a pas été trouvée.

3198 Un choix que l'on peut regretter a posteriori dans la sélection des systèmes précipitants
3199 est de s'être limité aux événements qui ont lieu pendant l'automne étendu (SOND), qui
3200 est leur période d'occurrence en climat présent. Cela nous prive de l'étude d'un éventuel
3201 changement de saisonnalité de ces événements en réponse au changement climatique. En
3202 comparant les simulations de UM-UKMO en climat présent et fin de siècle, Chan et al

3203 (2020) indiquent peu de changement dans notre zone d'intérêt pour la saison d'occur-
3204 rence des extrêmes horaires de précipitation qui reste l'automne, mais Müller et al (2023)
3205 montrent une augmentation plus marquée de la fréquence des systèmes fortement précipi-
3206 tants l'hiver, ce qui suggérerait donc une possible extension de la saisonnalité. Comme j'ai
3207 réalisé le tracking sur toute l'année, cette perspective pourra être réalisée dans un futur
3208 proche.

3209 4.3.3 Bilan

3210 Malgré certaines limites précisées ci-dessus, l'étude de l'évolution future des épisodes
3211 méditerranéens avec un ensemble de simulations de CP-RCMs a permis de mettre en évi-
3212 dence :

- 3213 • une confiance accrue dans l'intensification de ces phénomènes dans un climat plus
3214 chaud : les résultats obtenus à partir de simulations de CP-RCMs qui ont démontré
3215 leur bonne performance en climat présent, viennent renforcer les résultats obtenus
3216 dans des études précédentes. Cette augmentation s'accompagne également du change-
3217 ment d'autres propriétés des systèmes fortement précipitants avec une augmentation
3218 de la surface et du volume.
- 3219 • pour les changements de fréquence, l'information donnée par le GCM ou le RCM sur
3220 la dynamique de grande échelle semble dominer, pilotant de possibles changements
3221 dans l'occurrence des régimes de temps favorables à ces événements via un possible
3222 élargissement de la zone de subsidence subtropicale et/ou un déplacement des routes
3223 dépressionnaires sur l'Atlantique Nord (Oudar et al, 2020). Il semble logique à l'avenir
3224 de s'intéresser à de grands ensembles de GCMs/RCMs pour travailler sur la question
3225 du changement de fréquence des épisodes méditerranéens car les ensembles de CP-
3226 RCMs resteront encore longtemps trop limités pour y répondre.

3227

Chapitre 5

3228

Conclusions et perspectives

3229

3230

3231

3232

3233

Ce chapitre de conclusions et de perspectives présente tout d'abord un bilan de la faisabilité technique et de l'approche méthodologique mis en oeuvre au cours de cette thèse. Par la suite, pour chacune des deux questions scientifiques posées dans le chapitre d'introduction, une réponse est donnée, suivie de pistes d'amélioration et de perspectives. Enfin, quelques perspectives d'ordre plus général sont présentées.

3234

5.1 Conclusion méthodologique

3235

5.1.1 Les épisodes méditerranéens comme objet d'étude

3236

3237

3238

3239

3240

3241

3242

3243

Les épisodes méditerranéens qui concernent chaque automne le nord-ouest de la Méditerranée et apportent des cumuls de précipitation dépassant les 100 mm en moins de 24 heures, voire en quelques heures, sont des événements météorologiques à fort impact. Les attentes sociétales pour connaître leur réponse au changement climatique sont importantes.

Ces événements sont associés à des systèmes convectifs complexes qui sont générés par la combinaison d'une situation météorologique de grande échelle favorable et de différents processus de méso-échelle à petite échelle, sous l'influence de la topographie particulière des régions méditerranéennes.

3244

3245

3246

Jusqu'à récemment, en raison de leur résolution grossière et de la paramétrisation de la convection profonde, les modèles de climat ne permettaient pas une représentation correcte de ces phénomènes.

3247

3248

5.1.2 Le modèle régional de climat à convection profonde résolue (CP-RCM) : un nouvel outil de modélisation climatique

3249

3250

3251

3252

3253

Depuis plus de trente ans, afin de répondre aux attentes sociétales aux échelles régionales et locales, des modèles régionaux de climat ont été développés. L'augmentation de la résolution sur une région d'intérêt, par une descente d'échelle dynamique à partir des modèles globaux de climat, permet, en effet, de mieux représenter les climats régionaux et leurs particularités liées à une topographie ou des surfaces complexes.

3254 Depuis une dizaine d'années, l'augmentation de la puissance de calcul a permis d'aug-
3255 menter la résolution de ces modèles régionaux de climat, et de passer de la résolution de
3256 12 km, résolution typique des RCMs des exercices récents de Med-CORDEX ou d'EURO-
3257 CORDEX, à des résolutions comprises entre 2 et 3 km. Ces résolutions plus fines permettent
3258 tout d'abord une meilleure représentation de la topographie et des surfaces. Mais ce saut
3259 de résolution permet également de franchir une étape importante pour la représentation
3260 de la convection dans les modèles : en effet, aux résolutions kilométriques, il est possible
3261 de s'affranchir de la paramétrisation de la convection profonde, source importante d'in-
3262 certitude, qui peut donc être explicitement simulée par la dynamique non-hydrostatique
3263 de ces modèles. La haute résolution permet également l'implémentation de paramétrisa-
3264 tions physiques plus sophistiquées. En Europe, plusieurs groupes de recherche ont ainsi
3265 développé ces modèles appelés CP-RCMs pour Convection-Permitting Regional Climate
3266 Models, en s'appuyant soit sur l'expérience de modèles à haute résolution utilisés en pré-
3267 vision numérique du temps (PNT), comme pour le modèle CNRM-AROME, soit sur des
3268 RCMs existants.

3269 Toutefois, ces modèles régionaux de climat à résolution kilométrique sont particuliè-
3270 rement coûteux, en termes de puissance de calcul, mais également en termes de volume
3271 de stockage des données. Ces coûts numériques entraînent des contraintes fortes pour la
3272 définition des simulations et des compromis doivent être trouvés entre la taille du domaine,
3273 la longueur et le nombre de simulations, ou encore le choix des variables de sortie. Ces
3274 coûts ne permettent pas encore non plus d'appliquer des méthodes de tuning pour régler
3275 au mieux certains paramètres des modèles pour des simulations longues. De plus, mal-
3276 gré l'augmentation de résolution, certains processus physiques, comme la turbulence ou la
3277 convection peu profonde, restent des processus sous-maille qui doivent donc toujours être
3278 paramétrisés et peuvent donc être sources d'incertitude. De même, les modèles régionaux à
3279 aire limitée dépendent des conditions aux limites imposées à leurs bords par leurs modèles
3280 forceurs qui doivent donc être choisis avec attention afin d'éviter le "Garbage in, garbage
3281 out" (Giorgi and Mearns, 1999) ou le "More detailed noise" (Kerr, 2013).

3282 **5.1.3 Un ensemble de simulations avec des CP-RCMs**

3283 Le développement de cette nouvelle génération de RCMs a ouvert de nombreuses op-
3284 portunités dans lesquelles a pu s'inscrire cette thèse.

3285 Ainsi, au CNRM, les premiers résultats prometteurs avec CNRM-AROME (2.5 km),
3286 dont les premières simulations en climat datent de 2014, ont poussé à continuer et multiplier
3287 les simulations avec ce modèle, grâce à l'allocation de temps de calcul et de stockage
3288 nécessaire.

3289 J'ai donc pu tout d'abord réaliser une longue simulation d'évaluation de 38 ans avec
3290 le modèle CNRM-AROME sur un domaine couvrant le nord-ouest de la Méditerranée, qui
3291 constitue, à ma connaissance, la plus longue simulation d'évaluation existante avec un CP-
3292 RCM. Outre que de telles simulations sont nécessaires pour une évaluation pertinente des
3293 phénomènes rares, leur faisabilité technique a ici été démontrée, grâce à des puissances de
3294 calcul et d'archivage des données adéquates. De même, des simulations de vingt ans ont pu

3295 être réalisées avec ce modèle pour les périodes historique, milieu de siècle et fin de siècle
3296 en mode scénario.

3297 Dans le même temps, le programme international CORDEX-FPS Convection et le pro-
3298 jet européen EUCP ont rassemblé de nombreux groupes de recherche européens dans le
3299 but de coordonner les simulations et les études multi-modèles avec des CP-RCMs. En
3300 particulier, le FPS Convection a permis la définition d'un domaine pan-alpin commun et
3301 d'un protocole de simulations. Cela a rendu possible la création d'un ensemble unique de
3302 simulations de CP-RCMs avec une vingtaine de simulations d'évaluation et une quinzaine
3303 de simulations en mode scénario disponibles et dont j'ai eu l'opportunité de disposer pour
3304 cette thèse.

3305 **5.1.4 Des observations de référence**

3306 Pour évaluer la capacité des CP-RCMs à reproduire les extrêmes de précipitation de
3307 l'automne, pré-requis pour l'étude des changements futurs, les bases de données utilisées
3308 jusqu'ici en climat ne suffisent plus : il est maintenant nécessaire d'utiliser des observations
3309 de référence de résolutions spatiale et temporelle suffisantes, c'est-à-dire kilométrique et ho-
3310 raire, de bonne qualité, disponibles sur les périodes les plus longues possibles et homogènes
3311 dans le temps.

3312 Ce type de bases de données est encore rare, mais sur la France, nous avons la chance
3313 de disposer du produit COMEPHORE (1 km, 1h, 1997-2022) combinant données radar
3314 spatialement continues et données de pluviomètre. Malgré quelques limitations dont la
3315 principale est une sous-estimation des valeurs de précipitation au dessus de 1500 m, cette
3316 base de données répond aux différents critères. Pour ma zone d'étude, c'est donc sur la
3317 France que les données d'observation sont les plus fiables, ce qui explique qu'un focus ait
3318 été fait, tout au long de la thèse, sur les régions méditerranéennes françaises.

3319 **5.1.5 L'approche objet : un nouvel outil d'analyse des CP-RCMs**

3320 Grâce à la haute résolution et la simulation explicite de la convection profonde, la
3321 nouvelle génération de modèles de climat permet, en se rapprochant des échelles spatio-
3322 temporelles en jeu, une bonne représentation des systèmes convectifs. Ainsi, il devient
3323 possible d'aller au-delà de l'approche eulérienne classique et de mettre en place un suivi
3324 lagrangien orienté objet pour étudier la propagation et les caractéristiques intrinsèques des
3325 événements convectifs extrêmes. De par leurs échelles spatio-temporelles et l'organisation
3326 de la convection associée, les épisodes méditerranéens au travers des systèmes fortement
3327 précipitants associés se prêtent particulièrement à l'application de la méthode lagrangienne.

3328 Au cours de cette thèse, j'ai ainsi appliqué l'outil OSIRIS de suivi et de détection des
3329 systèmes précipitants aux précipitations horaires de CNRM-AROME, mais également de
3330 l'ensemble de CP-RCMs du FPS Convection, ainsi qu'aux données observées. Des critères
3331 ont été déterminés afin de sélectionner les systèmes fortement précipitants faisant partie
3332 des épisodes méditerranéens.

3333 Cette nouvelle approche m'a tout d'abord permis d'évaluer la capacité des CP-RCMs
3334 à reproduire les principales caractéristiques des systèmes fortement précipitants de l'au-
3335 tomne. Appliquée aux simulations en mode scénario, cette approche a également permis
3336 d'étudier les changements éventuels des propriétés de ces systèmes dans un climat plus
3337 chaud, en distinguant le nombre de systèmes et donc leur fréquence, de leurs caractéris-
3338 tiques intrinsèques.

3339 **5.2 Les événements précipitants intenses méditerranéens sont-ils bien représentés par les modèles ré-** 3340 **gionaux de climat à convection profonde résolue ?**

3342 **5.2.1 Les CP-RCMs apportent de la valeur ajoutée**

3343 Dans cette thèse, la performance des CP-RCMs pour représenter les événements préci-
3344 pitants intenses du nord-ouest de la Méditerranée a été tout d'abord évaluée. Cela a été
3345 fait à la fois pour un ensemble de simulations d'évaluation, c'est-à-dire forcées par la ré-
3346 analyse ERA-Interim, soit le meilleur forçage disponible au moment où les simulations ont
3347 été réalisées, mais également pour les simulations historiques où les conditions aux limites
3348 sont imposées par des GCMs (avec dans chaque cas l'utilisation d'un RCM intermédiaire
3349 pour limiter le saut de résolution).

3350 Dans un premier temps, la capacité des modèles de climat à résolution kilométrique
3351 à bien représenter les statistiques eulériennes des extrêmes de précipitation sur le nord-
3352 ouest de la Méditerranée a été démontrée. Que ce soit pour les simulations d'évaluation ou
3353 pour les simulations historiques, pour le modèle CNRM-AROME ou pour l'ensemble multi-
3354 modèle, la valeur ajoutée des CP-RCMs par rapport aux RCMs à résolution plus grossière
3355 et convection profonde paramétrisée a été confirmée pour les extrêmes de précipitation
3356 de l'automne dans la zone pan-alpine (Caillaud et al, 2021; Ban et al, 2021; Pichelli et al,
3357 2021). En particulier, les CP-RCMs améliorent la localisation et l'intensité des extrêmes
3358 de précipitation et ces améliorations sont plus importantes au pas de temps horaire qu'au
3359 pas de temps quotidien. Le fait que cette amélioration soit également présente dans les
3360 simulations historiques montre que ces caractéristiques sont peu sensibles au choix et aux
3361 biais du modèle forceur, qui affectent surtout la fréquence des événements précipitants.

3362 Dans un deuxième temps, la capacité des CP-RCMs à représenter les caractéristiques
3363 des systèmes fortement précipitants de l'automne a été évaluée en appliquant l'approche
3364 lagrangienne aux simulations. La comparaison des différentes caractéristiques des systèmes
3365 précipitants de l'automne observés et simulés par les CP-RCMs démontre également le
3366 bon comportement de cette nouvelle génération de modèles de climat : ces modèles à haute
3367 résolution et convection profonde explicite sont capables de représenter correctement les
3368 principales propriétés de ces systèmes, en termes de nombre et de positionnement géogra-
3369 phique sur l'ensemble du domaine pan-alpin où des observations sont disponibles, mais aussi
3370 sur le pourtour méditerranéen français qui dispose d'observations plus fiables, en termes
3371 de durée, d'intensité, de surface, de volume, de vitesse et de sévérité (malgré quelques biais

3372 qui sont précisés ci-après). Pour ces caractéristiques, les simulations avec CCLM, UM et
3373 WRF sont celles qui présentent généralement les biais les plus faibles. Ces conclusions sont
3374 confirmées par Müller et al (2022) qui utilisent une diversité d'outils de tracking.

3375 Cette étude d'évaluation des CP-RCMs pour les épisodes méditerranéens a ainsi per-
3376 mis de mettre en évidence que les modèles de climat régionaux à convection profonde
3377 résolue sont les outils de modélisation appropriés pour l'étude des épisodes méditerranéens
3378 à l'échelle climatique.

3379 De plus, la bonne performance et la valeur ajoutée des CP-RCMs pour représenter
3380 les systèmes fortement précipitants de l'automne permettent d'accorder une plus grande
3381 confiance en ces nouveaux modèles et donc en leurs projections futures.

3382 5.2.2 Les CP-RCMs présentent quelques limitations

3383 Toutefois, les études d'évaluation ont permis de mettre en évidence des biais systéma-
3384 tiques communs à l'ensemble des CP-RCMs ou spécifiques à certains CP-RCMs ou familles
3385 de CP-RCMs pour la représentation des systèmes fortement précipitants de l'automne. La
3386 plupart de ces biais ont été retrouvés à la fois pour l'évaluation des simulations d'évaluation
3387 et pour celle des simulations historiques : ils semblent donc peu dépendre du forçage au
3388 bord, mais seraient des biais intrinsèques des modèles.

3389 Certains écarts aux observations sont communs à toutes les simulations comme la sur-
3390 estimation du nombre de systèmes précipitants sur le relief, qui renvoie à la surestimation
3391 des précipitations sur les massifs montagneux déjà mise en évidence dans de nombreuses
3392 études avec des CP-RCMs (Ban et al, 2014, 2021; Lüthi et al, 2019), mais que l'on peut
3393 difficilement quantifier compte-tenu de la sous-estimation connue des observations sur ces
3394 zones. La majorité des simulations sous-estiment le nombre de systèmes précipitants sur
3395 le piémont des Cévennes jusqu'en plaine, ce qui pourrait être lié à des difficultés pour cer-
3396 tains CP-RCMs à représenter des processus convectifs de méso-échelle, tels que les dômes
3397 froids (Hirt et al, 2020). Les simulations avec AROME se comportent mieux sur ce point.
3398 Enfin, sur la zone méditerranéenne française, l'ensemble des simulations ont tendance à
3399 surestimer les durées de vie et les vitesses de déplacement des systèmes.

3400 D'autres biais sont spécifiques à certains CP-RCMs ou à des familles de CP-RCMs.
3401 Ainsi, les simulations avec le CP-RCM AROME présentent une surestimation systéma-
3402 tique de la taille et du volume des systèmes précipitants, ainsi qu'une sous-estimation des
3403 intensités les plus fortes. Ces biais avaient déjà été mis en évidence pour AROME en PNT
3404 (Brousseau et al, 2016). Le modèle RegCM surestime également les surfaces, mais aussi
3405 les intensités maximales, ce qui conduit à une forte surestimation des sévérités et surtout
3406 des volumes. Le modèle REMO sous-estime le nombre de systèmes de manière importante,
3407 surestime les durées et présente une très forte surestimation des surfaces, des volumes et
3408 des sévérités.

3409 Les biais des simulations avec RegCM et REMO sont plus importants que ceux des
3410 autres simulations qui sont basées sur des CPMs ayant fait leur preuve en PNT et bénéficiant
3411 donc de l'expérience acquise en PNT. Ce sont tous deux des versions non-hydrostatiques
3412 de RCM nouvellement développées. L'amélioration de ces nouveaux modèles est en cours

3413 et une nouvelle version de RegCM a déjà été développée depuis que ces simulations ont été
3414 réalisées (Giorgi et al, 2023).

3415 Le choix des paramétrisations physiques pour un même modèle peut également avoir
3416 un impact fort. Cela a été mis en évidence pour la famille WRF où différentes versions du
3417 même modèle présentent des comportements différents, avec, par exemple, une différence
3418 en nombre de systèmes convectifs entre deux versions de WRF-IPSL.

3419 **5.2.3 Comment améliorer le protocole expérimental ?**

3420 Les éléments suivants sont des pré-requis encore perfectibles pour réaliser une évaluation
3421 correcte de cette nouvelle génération de modèles de climat.

3422 **5.2.3.1 L'amélioration des bases de données de référence**

3423 Afin de mesurer la valeur ajoutée des CP-RCMs, il faut tout d'abord disposer d'obser-
3424 vations de référence fiables, ce qui n'est pas encore toujours le cas. En effet, pour évaluer
3425 correctement les modèles climatiques à résolution kilométrique, les observations de référence
3426 doivent satisfaire des critères contraignants en termes de résolution, qualité et disponibilité.
3427 Le respect de ces contraintes est encore plus important pour l'étude des extrêmes de précipi-
3428 tation horaire, en raison de la grande variabilité dans l'espace et dans le temps du champ
3429 de précipitation. De nos jours, peu de jeux de données satisfont ces besoins. La combinaison
3430 de données radar spatialement continues et de données de stations de mesure permet de
3431 remplir plusieurs de ces critères, mais peu de bases de données de ce type existent encore
3432 en Europe. Sur notre zone d'intérêt, nous avons la chance de disposer de produits de ce
3433 type sur la France et sur la Suisse (mais la courte disponibilité du produit, moins de dix
3434 ans, limite son utilisation). Le développement de ce type de produit, qui est en cours en
3435 Croatie par exemple, doit donc être encouragé dans les autres pays, comme en Italie ou en
3436 Espagne. Dans le même temps, il faut continuer à améliorer la mesure des précipitations,
3437 en particulier dans les zones montagneuses. En effet, le problème de sous-estimation des
3438 précipitations observées sur le relief limite notre capacité à évaluer les modèles sur ces
3439 zones. Des avancées sont attendues sur ce point avec, par exemple, l'utilisation de radars
3440 à double polarisation en bande X (Anagnostou et al, 2018) qui limite la sous-estimation
3441 en montagne ou la mise en place de campagnes de mesure sur les Alpes dans le cadre
3442 du programme international TEAMx¹. Nous pouvons également imaginer un produit de
3443 précipitation grillé européen combinant les données du réseau européen de radars météo-
3444 rologiques opérationnels OPERA (Saltikoff et al, 2019) et les données de pluviomètres. Le
3445 manque de données de référence est encore plus marqué sur mer : une augmentation des
3446 résolutions temporelles et spatiales des produits d'estimation des précipitations basés sur
3447 l'imagerie satellitaire est souhaitable.

3448 Une réanalyse à haute résolution ARRA (Réanalyse à échelle kilométrique basée sur
3449 AROME) est en cours de réalisation sur la France métropolitaine et vise à produire une
3450 analyse des paramètres de surface sur une profondeur de 50 ans à haute résolution horizon-
3451 tale (1.3 km) et temporelle (1h) en remplacement des analyses SAFRAN actuelles (8 km).

1. <http://www.teamx-programme.org>

3452 Cette réanalyse dont la mise à disposition est prévue en 2026 pourra être utilisée dans les
3453 prochaines années pour l'évaluation des CP-RCMs sur la France.

3454 **5.2.3.2 L'allongement de la durée des simulations**

3455 Pour augmenter la robustesse de l'évaluation et compte-tenu de la grande variabilité
3456 inter-annuelle des épisodes méditerranéens, une évaluation sur de plus longues périodes
3457 serait souhaitable, comme cela a déjà pu être fait avec une simulation d'évaluation de 38
3458 ans de CNRM-AROME.

3459 Des simulations encore plus longues permettraient également de vérifier si les modèles
3460 sont capables de reproduire les tendances passées. Une étude des tendances du nombre
3461 d'événements suivant Ribes et al (2019) a été appliquée à la simulation de CNRM-AROME,
3462 mais la période était encore trop courte pour détecter les tendances observées.

3463 **5.2.3.3 L'amélioration des conditions aux limites**

3464 Pour améliorer la comparaison aux observations, il peut être également nécessaire
3465 d'améliorer les conditions aux bords et en surface imposées au CP-RCM.

3466 Ainsi, l'utilisation de SSTs mensuelles de résolution 80 km dans les simulations d'éva-
3467 luation des CP-RCMs de l'exercice CORDEX FPS Convection est un facteur limitant pour
3468 la bonne représentation de certaines interactions de fine échelle entre les basses couches de
3469 l'atmosphère et la couche de mélange océanique, qui joue un rôle important dans l'apport
3470 d'humidité et d'instabilité convective par la mer Méditerranée pendant les épisodes mé-
3471 diterranéens. Ces derniers peuvent donc être potentiellement moins bien représentés par
3472 les modèles, non pas en raison de problèmes venant du modèle, mais du forçage de sur-
3473 face imprécis. Une étude débute conjointement entre les FPS-airsea et FPS-Convection de
3474 Med-CORDEX afin de déterminer l'impact des structures océaniques à petite échelle sur
3475 le climat régional en comparant des simulations d'évaluation de CP-RCMs forcés par des
3476 SSTs de différentes résolutions. Des recommandations pourront être données pour améliorer
3477 les protocoles de forçage, en attendant l'arrivée de simulations couplées avec l'océan.

3478 De même, avant l'ajout de schéma d'aérosols interactifs dans les CP-RCMs, des climato-
3479 logies d'aérosols prenant en compte des observations comme Nabat et al (2013) ou venant
3480 de simulations d'évaluation avec aérosols interactifs comme ALDERA-3 (Nabat et al, 2020)
3481 doivent être privilégiées.

3482 Concernant les forçages atmosphériques, le pilotage spectral qui permet de s'assurer de
3483 la conservation de la grande échelle a été utilisé dans les simulations d'évaluation de CNRM-
3484 AROME pour le RCM intermédiaire CNRM-ALADIN. Sa pertinence a été démontrée pour
3485 l'étude par événements et celle de la variabilité interannuelle.

3486 L'augmentation de résolution des réanalyses, avec le passage de ERA-Interim (80 km)
3487 utilisé pour l'exercice CORDEX FPS Convection à ERA5 (30 km) du CEPMMT qui est
3488 maintenant disponible, permettra également d'améliorer les conditions aux limites. Avec
3489 un saut de résolution de 1 à 12 entre ERA5 et CNRM-AROME, il devient maintenant
3490 possible de forcer directement le CP-RCM par les réanalyses globales et donc d'éviter
3491 l'étape intermédiaire du RCM, source potentielle d'incertitude supplémentaire.

3492 **5.2.4 Comment améliorer le comportement des CP-RCMs ?**

3493 L'augmentation de la performance et de la valeur ajoutée passe d'abord par l'amélioration des modèles. Malgré une résolution plus fine et le réalisme apparent des sorties, 3494 les CP-RCMs restent des modèles numériques avec des approximations et des simplifications, 3495 et donc de possibles imperfections. L'évaluation de la représentation des systèmes 3496 fortement précipitants de l'automne a mis en évidence certaines faiblesses pour certains 3497 modèles. Les solutions suivantes pourraient être envisagées pour résoudre ces problèmes 3498 (on s'intéressera en particulier au modèle CNRM-AROME). 3499

3500 **5.2.4.1 L'amélioration des paramétrisations physiques**

3501 Alors que la convection profonde est explicitement résolue par la dynamique des CP- 3502 RCMs, les processus sous-maille tels que la convection peu profonde, la turbulence ou les 3503 processus microphysiques doivent encore être paramétrisés. Des améliorations ou des adap- 3504 tations de ces paramétrisations, par des méthodes de tuning par exemple (Couvreur et al, 3505 2021), peuvent être un moyen de résoudre les faiblesses mises en évidence pour les mo- 3506 dèles. Pour le modèle RegCM, la surestimation des intensités maximales mise en évidence 3507 par Stocchi et al (2022) et également dans cette thèse, a été corrigée dans la nouvelle 3508 version de RegCM récemment développée (Giorgi et al, 2023) par des changements des 3509 paramétrisations. Concernant CNRM-AROME, des tests avec de nouveaux schémas de 3510 paramétrisation sont réalisés côté PNT, comme l'utilisation du schéma microphysique à 3511 deux moments, LIMA, dont l'intérêt a été montré pour les épisodes méditerranéens avec 3512 une meilleure représentation des aérosols (Taufour, 2018) ou un nouveau schéma de rayon- 3513 nement, ecRad. Si les tests sont concluants et à condition qu'ils ne soient pas trop coûteux, 3514 ces schémas pourront également être implémentés en climat.

3515 **5.2.4.2 L'amélioration de la dynamique**

3516 Comme le système d'équations de la dynamique n'a pas de solution analytique, il faut 3517 le résoudre par discrétisation dans l'espace et dans le temps, ce qui introduit nécessai- 3518 rement des approximations. Le choix des discrétisations diffère entre les modèles et peut 3519 également expliquer certaines différences. Par exemple, avec des paramétrisations physiques 3520 très proches, les modèles Méso-NH et AROME reposent sur des choix assez différents pour 3521 la dynamique avec un modèle Méso-NH en points de grille, basé sur des schémas eulé- 3522 rien et explicite et un modèle AROME spectral basé sur des schémas semi-lagrangien et 3523 semi-implicite. Ricard et al (2013) montrent que les résolutions effectives sont assez dif- 3524 férentes entre ces deux modèles pour une même résolution nominale de 2.5 km : 5-6 Δx 3525 pour Méso-NH et 9-10 Δx pour AROME. Ils indiquent l'impact de la diffusion implicite 3526 du schéma semi-implicite semi-lagrangien utilisé dans AROME sur la résolution effective. 3527 Ce choix, qui permet un gain important sur le temps de calcul, augmente également la 3528 résolution effective et donc la taille des systèmes convectifs simulés explicitement par le 3529 modèle. Cela pourrait donc expliquer la surestimation des surfaces mise en évidence pour 3530 les systèmes convectifs méditerranéens. Pour CNRM-AROME, il n'est pas envisagé de mo- 3531 difier ces choix de résolution de la dynamique, mais les ajustements faits pour le modèle

3532 opérationnel pour améliorer ce point seront également implémentés pour les simulations
3533 climatiques. De même, l'équipe de recherche du GERICS pense que la réduction de leurs
3534 biais doit passer par des ajustements de la diffusion horizontale. Pour mieux appréhen-
3535 der les possibles différences entre CP-RCM concernant leur résolution effective, il serait
3536 intéressant de calculer ces résolutions effectives pour les différents modèles utilisés dans
3537 cette thèse, puis de les mettre en regard des biais mis en évidence pour les différentes
3538 caractéristiques des systèmes précipitants.

3539 5.2.4.3 L'augmentation de résolution

3540 Une autre piste d'amélioration possible peut être l'augmentation de résolution horizon-
3541 tale et/ou verticale des modèles. Ainsi, on a vu ci-dessus que la résolution effective des
3542 modèles pouvait limiter la représentation de cellules convectives à partir d'une certaine
3543 taille. Ainsi, pour CNRM-AROME, la résolution horizontale de 2,5 km et les 60 niveaux
3544 verticaux pourraient ne pas être suffisants pour résoudre explicitement toute la convection
3545 profonde et représenter correctement les caractéristiques de certaines cellules convectives.
3546 Une augmentation de la résolution pourrait améliorer ces problèmes. Cela a été montré par
3547 Brousseau et al (2016) pour AROME PNT : lorsque la résolution horizontale de la grille
3548 passe de 2,5 à 1,3 km et la résolution verticale de 60 à 90 niveaux, les cellules convectives
3549 sont plus réalistes en termes de taille, de nombre, d'intensité et de durée de vie. Nous pou-
3550 vons donc supposer que l'augmentation de résolution de CNRM-AROME pourrait aussi
3551 améliorer la représentation des caractéristiques des cellules par le modèle. Une comparaison
3552 de simulations à 1.3 km et 2.5 km de CNRM-AROME, sur une durée d'au moins un an,
3553 devrait être réalisée et combinée à l'approche objet pour confirmer l'effet de l'augmentation
3554 de résolution sur les caractéristiques des systèmes convectifs.

3555 5.2.4.4 La complexification

3556 Même si elle est encore limitée compte-tenu du coût des simulations, la complexifi-
3557 cation des CP-RCMs peut être envisagée avec l'ajout progressif de composantes du sys-
3558 tème climatique. Ainsi, au CNRM, le projet AROBASE² prépare le remplacement futur
3559 d'ALADIN par AROME dans les simulations climatiques du modèle couplé CNRM-RCSM
3560 (Sevault et al, 2014), en particulier sur le domaine méditerranéen. De même, l'association
3561 d'un schéma interactif d'aérosol avec le schéma microphysique LIMA pourrait être testée.

2. Application de la Recherche à l'Opérationnel pour l'assemblage d'Arome avec des Systèmes Environnementaux ou AROME-BASEd coupled SystEm - Projet du CNRM dont le but est, d'ici 2024, l'assemblage d'un système de modélisation à fine échelle prenant en compte l'atmosphère (AROME), la chimie, l'océan (NEMO), les surfaces continentales dont l'hydrologie (CTRIP) et les vagues (MFWAM), pour les besoins de la PNT et de la recherche.

5.3 Que révèlent les modèles de dernière génération sur la réponse de ces phénomènes au changement climatique et quelles sont les incertitudes associées ?

Les épisodes méditerranéens sont des événements extrêmes particuliers car leur occurrence est conditionnée par une situation météorologique de grande échelle favorable, à laquelle s'ajoutent différents forçages et rétroactions de petite ou méso-échelle qui peuvent se combiner entre eux. Les études existantes sur l'évolution des pluies extrêmes dans le bassin méditerranéen basées sur des RCMs et GCMs essentiellement font état d'importantes incertitudes qui pourraient provenir de la compensation entre une diminution de la fréquence des conditions météorologiques favorables à ces événements en raison de changement de dynamique de grande échelle, et les augmentations thermodynamiques des pluies extrêmes, liées au réchauffement.

L'utilisation de CP-RCMs, dont la capacité à bien représenter les principales caractéristiques des épisodes méditerranéens a été démontrée, augmente d'une part la confiance qui peut être apportée en leur projections futures, mais permet également, par l'application de l'approche objet, de distinguer les changements en nombre de systèmes, donc de fréquence, des changements des caractéristiques intrinsèques des systèmes convectifs comme leur intensité.

5.3.1 Certains changements sont robustes

Lorsque des changements sont présents dans la grande majorité, voire dans toutes les simulations de CP-RCMs de l'ensemble du FPS Convection et d'autant plus qu'ils confirment des études passées, les changements proposés peuvent être qualifiés de robustes. En fin de siècle, selon le scénario à fortes émissions RCP8.5, les principaux changements robustes mis en évidence sont les suivants :

- Toutes les simulations proposent une augmentation de la fréquence des systèmes fortement précipitants (dont les intensités sont supérieures à 10 mm/h) dans une grande partie du domaine pan-alpin, en particulier du centre de l'Italie au nord des Balkans ;
- Cette augmentation de fréquence s'accompagne d'une extension substantielle des zones touchées par les systèmes fortement précipitants de l'automne qui correspond à un doublement de ces zones pour la fin de siècle et le domaine pan-alpin : les Préalpes françaises, l'intérieur de l'Italie, de la Slovénie ou de la Croatie, le sud de l'Autriche pourront être affectés par des systèmes convectifs intenses durant l'automne, alors qu'ils sont peu touchés de nos jours ;
- Sur le pourtour méditerranéen français, l'ensemble de CP-RCMs confirme l'augmentation d'intensité des systèmes fortement précipitants de l'automne déjà suggérée par les études précédentes avec des RCMs ou des GCMs, avec un accord notable de

3600 toutes les simulations pour une augmentation des intensités moyennes et maximales
3601 au cours du cycle de vie des trajectoires (+0 à +11% et de +3 à +20% respec-
3602 tivement). En raison de cette augmentation d'intensité, les simulations s'accordent
3603 également sur une augmentation de la fréquence des événements les plus intenses.
3604 En accord également avec plusieurs études passées (John et al, 2022; Coppola et al,
3605 2021a; Trambly and Somot, 2018), les niveaux d'augmentation des intensités maxi-
3606 males de l'ensemble des trajectoires sélectionnées sont inférieurs au taux attendu
3607 par la relation de Clausius-Clapeyron (entre +0.8 et +4.8%/°C contre +7%/°C pour
3608 Clausius-Clapeyron). Par contre, si l'on s'intéresse aux queues de distribution des
3609 intensités maximales, les changements des valeurs pour des durées de retour de vingt
3610 ans peuvent atteindre jusqu'à quatre fois le taux de Clausius-Clapeyron ;

- 3611 — Une augmentation des surfaces et des volumes des systèmes précipitants est également
3612 projetée avec un bon accord parmi les simulations ;
- 3613 — L'influence du GCM forceur qui pilote les conditions de grande échelle favorables à
3614 la survenue de ces événements semble expliquer en grande partie les changements de
3615 fréquence des épisodes méditerranéens.

3616 Pour le milieu de siècle, les conclusions sont proches de celles données pour la fin du
3617 siècle, mais avec un rapport signal/bruit et des valeurs de changement plus faibles et moins
3618 souvent significatives. On peut toutefois souligner un accord de toutes les simulations pour
3619 une augmentation des intensités maximales de +1 à +10%.

3620 **5.3.2 Des incertitudes importantes restent présentes**

3621 Malgré la haute résolution et la simulation explicite de la convection des CP-RCMs,
3622 les approches eulériennes et lagrangiennes mises en oeuvre dans cette thèse ont mis en
3623 évidence la persistance d'importantes incertitudes dont les principales sont les suivantes :

- 3624 — Il n'y a pas d'accord clair entre les modèles pour les changements de fréquence des
3625 systèmes fortement précipitants (dont les intensités sont supérieures à 10 mm/h) sur
3626 une partie du domaine pan-alpin et en particulier sur le sud-est de la France, ce qui est
3627 probablement lié à des différences dans les changements de conditions synoptiques
3628 de grande échelle imposées par les GCMs en réponse aux forçages radiatifs et/ou
3629 exprimant leur variabilité interne ;
- 3630 — Sur la zone méditerranéenne française, une large gamme de changements possibles
3631 est proposée dans les propriétés des systèmes fortement précipitants suivant les simu-
3632 lations, et y compris si l'on normalise l'augmentation d'intensité par le réchauffement
3633 régional correspondant ;
- 3634 — Pour les événements les plus intenses, on retrouve également une large gamme de
3635 changements possibles que ce soit pour la fréquence (de +38% à +326%) ou pour
3636 les valeurs d'intensité maximale de durée de retour de 20 ans (jusqu'à +95%) qui ne
3637 peuvent pas être facilement expliqués par le choix du CP-RCM, du GCM forceur ou
3638 le taux de réchauffement régional ;

3639 — Une simulation, celle de UM-UKMO, propose un changement dans la convection
3640 différent de celui des autres simulations, mais tout aussi plausible, avec des systèmes
3641 convectifs plus nombreux, des durées de vie plus courtes, des tailles réduites et des
3642 intensités plus fortes.

3643 Rechercher la source de ces incertitudes n'est pas simple. Si l'on peut écarter l'in-
3644 certitude liée au scénario socio-économique qui n'est pas explorée ici puisque toutes les
3645 simulations sont forcées par le même scénario RCP8.5, il est plus difficile de distinguer les
3646 incertitudes liées aux différents modèles de climat CP-RCM/RCM/GCM, de l'incertitude
3647 liée à la variabilité naturelle du climat qui peut s'exprimer en raison de la courte durée des
3648 simulations et de la taille relativement restreinte de l'ensemble.

3649 Des perspectives sont proposées dans les deux prochaines sous-parties pour comprendre
3650 l'origine des changements et de certaines incertitudes avec quelques pistes pour tenter de
3651 les diminuer.

3652 **5.3.3 Comment comprendre les changements et l'origine des in-** 3653 **certitudes ?**

3654 **5.3.3.1 Par des tests numériques de sensibilité**

3655 La diversité des choix de forçage (taille du domaine, GCM, RCM intermédiaire...) au
3656 sein de l'ensemble de FPS Convection rend difficile l'interprétation des résultats. Ainsi,
3657 les simulations avec UM-UKMO qui sont celles dont le protocole de simulation présente
3658 le plus de différences sont également celles qui proposent un scénario différent pour les
3659 changements futurs de caractéristiques des systèmes convectifs dans un climat plus chaud.
3660 Il n'est pas possible, sans investigation complémentaire, de déterminer si ces changements
3661 sont liés à la taille du domaine qui, couvrant la région pan-européenne, pourrait permettre
3662 au CP-RCM de modifier la grande échelle (Chan et al, 2023), au GCM haute résolution
3663 non couplé qui force directement le CP-RCM ou à l'influence du CP-RCM lui-même. Pour
3664 mieux comprendre l'origine des changements, il serait donc intéressant d'effectuer diffé-
3665 rentes études comparatives :

- 3666 • sur le rôle du CP-RCM, en effectuant des simulations sur le même domaine pan-alpin,
3667 avec les mêmes conditions aux limites venant d'un couple RCM-GCM déterminé
3668 et avec plusieurs CP-RCMs. En passant à un domaine pan-européen, la potentielle
3669 modification de la circulation de grande échelle par le CP-RCM pourrait également
3670 être étudiée ;
- 3671 • sur le rôle du RCM en effectuant des simulations sur le même domaine pan-alpin,
3672 avec les conditions aux limites venant de plusieurs RCMs forcés par le même GCM
3673 et avec le même CP-RCM ;
- 3674 • sur le rôle du GCM en effectuant des simulations sur le même domaine pan-alpin,
3675 avec des conditions aux limites venant du même RCM forcé par plusieurs GCMs et
3676 avec le même CP-RCM.

3677 Le coût des simulations rend peu probable ce type d'études dans un futur proche, mais elles
3678 seraient toutefois utiles pour distinguer la part des différents modèles dans les incertitudes

3679 et dans les changements projetés de l'organisation de la convection.

3680 **5.3.3.2 Par l'étude des régimes de temps favorables aux épisodes méditerranéens** 3681

3682 L'influence du GCM qui pilote les conditions de grande échelle favorables aux épisodes
3683 méditerranéens semble dominante pour les changements de fréquence. Afin d'apporter des
3684 réponses robustes sur cet aspect, les simulations des larges ensembles déjà existants de
3685 GCMs ou de RCMs peuvent donc être utilisées pour déterminer l'évolution des régimes de
3686 temps favorables à ces événements et d'en déduire les changements potentiels de fréquence
3687 associés.

3688 Plusieurs études portent sur l'évolution future des régimes de temps en Europe (Zappa et al,
3689 2013; Harvey et al, 2020; Oudar et al, 2020; de Vries et al, 2022), mais peu d'études s'in-
3690 téressent de manière spécifique aux régimes favorables aux précipitations extrêmes médi-
3691 terranéennes de l'automne. A partir d'un ensemble de 26 GCMs de CMIP5, Brigode et al
3692 (2018) montrent une légère tendance à la diminution des trois régimes de temps associés à
3693 des précipitations sur le sud-est de la France entre le début et la fin du 21e siècle et selon
3694 le scénario RCP8.5.

3695 La méthode de classification en régimes de temps qui a permis à Nuissier et al (2011)
3696 de mettre en évidence les configurations favorables aux épisodes méditerranéens français a
3697 été appliquée par Beaulant et al (2011) aux réanalyses ERA40 et est actuellement utilisée
3698 à Météo-France pour prévoir le risque d'épisodes méditerranéens dans la prévision d'en-
3699 semble du modèle ARPEGE (Joly et al, 2012). Un prolongement naturel de mon étude sera
3700 d'appliquer cette méthode à de larges ensembles de RCMs et de GCMs et de déterminer
3701 ainsi, de manière robuste, l'évolution de fréquence des configurations favorables, et donc
3702 l'évolution de la fréquence des épisodes méditerranéens français.

3703 **5.3.3.3 Par des outils diagnostiques**

3704 L'utilisation de la nouvelle génération de modèle de climat à résolution kilométrique
3705 a rendu possible l'étude des changements des caractéristiques intrinsèques des systèmes
3706 fortement précipitants dans un climat plus chaud.

3707 Mais ces nouveaux modèles peuvent également être utilisés pour comprendre les change-
3708 ments projetés des systèmes convectifs futurs, ce qui n'était pas possible avec les modèles de
3709 climat précédents. En effet, l'utilisation des CP-RCMs permet maintenant d'étudier les pro-
3710 cessus thermo-dynamiques ou dynamiques de petite à méso-échelle en jeu, afin d'expliquer
3711 les modifications de la convection (Prein et al, 2017; Kahraman et al, 2021; Berthou et al,
3712 2022).

3713 Concernant les systèmes fortement précipitants de l'automne, il s'agira donc de com-
3714 biner les champs à haute résolution spatiale et temporelle des CP-RCMs et l'approche
3715 lagrangienne afin de sélectionner les événements et de définir des diagnostics axés sur les
3716 processus, comme des composites de variables environnementales (eau précipitable, tem-
3717 pérature, humidité ou vent à différents niveaux). Appliquée à l'ensemble des CP-RCMs

3718 de l'ensemble du FPS Convection, cette méthode devrait également permettre de mieux
3719 comprendre les différences entre les modèles.

3720 L'ajout de variables supplémentaires, comme la grêle ou les rafales de vent permettra
3721 également de compléter la qualification des systèmes convectifs méditerranéens futurs.

3722 **5.3.4 Comment aller vers des résultats plus robustes ?**

3723 Afin de s'assurer de la robustesse des réponses apportées par les CP-RCMs et de limiter
3724 les incertitudes, plusieurs pistes, souvent complémentaires, peuvent être suivies.

3725 **5.3.4.1 L'amélioration des CP-RCMs**

3726 Les propositions indiquées dans la Section 5.2.4 pour améliorer la performance des
3727 modèles augmenteront également la confiance qui pourra être accordée dans leurs projec-
3728 tions. Ces améliorations permettront de diminuer l'incertitude épistémique liée au choix
3729 du CP-RCM.

3730 **5.3.4.2 L'amélioration des conditions aux limites**

3731 Les modèles à aire limitée dépendent fortement des conditions aux limites qui leur
3732 sont imposées. La poursuite de l'amélioration des RCMs et des GCMs est indispensable
3733 pour fournir les meilleurs forçages aux bords et en surface du CP-RCM. L'utilisation de
3734 modèles système terre (Earth System Models) les plus complets possibles permettra de
3735 mieux représenter le système climatique et donc de fournir un meilleur forçage pour le CP-
3736 RCM, notamment pour les conditions de grande échelle ou les SSTs. L'augmentation de
3737 résolution des GCMs permettra de se passer de l'étape intermédiaire du RCM qui constitue
3738 une source d'incertitude supplémentaire.

3739 L'amélioration des conditions aux limites devraient permettre une diminution de l'in-
3740 certitude épistémique liée au RCM et au GCM.

3741 **5.3.4.3 L'amélioration des ensembles de CP-RCMs**

3742 Disposer de l'ensemble de CP-RCMs du FPS Convection présente déjà une opportunité
3743 unique pour explorer les possibles dans un climat plus chaud. Pourtant, sa taille et la
3744 longueur des simulations sont limitées. De même, il constitue un "ensemble d'opportunité"
3745 avec une coordination encore faible sur certains aspects comme la méthode de forçage ou
3746 le choix des GCMs. Les premières études avec cet ensemble permettent de définir plusieurs
3747 recommandations pour la construction des futurs ensembles de CP-RCMs :

- 3748 • L'allongement des simulations semble essentiel quand on s'intéresse aux extrêmes afin
3749 de s'affranchir de la variabilité naturelle du climat : en effet, les simulations de 10 ans
3750 du FPS Convection ne sont pas assez longues pour évaluer avec précision les change-
3751 ments dans les extrêmes tels que les épisodes méditerranéens qui présentent une forte
3752 variabilité interannuelle. Ainsi, Kendon et al (2023) ont montré, en effectuant un en-
3753 semble de 12 simulations continues de 100 ans avec le modèle UM-UKMO sur les îles
3754 Britanniques, que les changements d'extrêmes de précipitation ne se traduisent pas

3755 par une tendance régulière, mais, en raison de la variabilité interne, des années avec
3756 des extrêmes peuvent être suivies de plusieurs décennies peu actives.

3757 • En attendant que des simulations continues soient possibles pour tous les groupes, le
3758 passage de périodes temporelles fixes à des niveaux de réchauffement global (Global
3759 Warming Level), comme cela est fait dans l'AR6 du GIEC, pourrait également per-
3760 mettre une meilleure comparaison entre les simulations sur l'effet du réchauffement
3761 sur les extrêmes de précipitation.

3762 • Des simulations sur des domaines plus vastes permettraient aux CP-RCMs d'exprimer
3763 leur propre variabilité interne et leur sensibilité intrinsèque, ce qui pourrait conduire
3764 à des rapports signal sur bruit différents.

3765 • Des ensembles plus grands avec des simulations plus nombreuses et également plu-
3766 sieurs scénarios permettraient d'explorer une gamme des possibles plus large. Des
3767 ensembles à physique perturbée avec un même CP-RCM peuvent aussi être envi-
3768 sagées, comme cela a déjà fait sur le Royaume-Uni par le UKMO (Kendon et al,
3769 2019).

3770 • Des ensembles mieux construits seraient également souhaitables avec des protocoles
3771 de forçage plus contraignants. De même, il est important de conserver la diversité
3772 des CP-RCMs au sein de l'ensemble, en évitant qu'une famille de CP-RCM soit
3773 surreprésentée ou en ajoutant d'autres modèles qui ne sont pas encore représentés
3774 comme les modèles australien ou canadien.

3775 L'amélioration des ensembles avec des simulations plus longues et plus nombreuses
3776 devrait permettre de mieux caractériser la part des incertitudes stochastiques, c'est-à-dire
3777 liées à la variabilité naturelle du climat.

3778 **5.3.4.4 La diversité des approches pour l'exploitation des simulations de CP-** 3779 **RCMs**

3780 La réalisation des simulations du FPS Convection a, pour certains groupes, mobilisé
3781 beaucoup de ressources et ils ne pourront pas tous réitérer cet exercice dans un futur proche.
3782 Il n'est donc pas assuré que d'autres ensembles de ce type soient disponibles prochainement
3783 sur l'Europe. Dans tous les cas, le coût des simulations à résolution kilométrique ne per-
3784 mettra pas de disposer de grands ensembles dans les prochaines années. D'autres méthodes
3785 doivent donc être envisagées :

3786 • l'approche par études de cas

3787 Cette approche permet soit de rejouer avec un modèle à aire limitée et haute réso-
3788 lution des situations choisies dans les GCMs ou les RCMs, comme cela avait été fait
3789 dans Beuland et al (2011), soit de sélectionner et d'étudier des situations dans des
3790 simulations de CP-RCM. Il est ainsi possible de caractériser les événements météo-
3791 rologiques extrêmes qui pourront être rencontrés dans un climat plus chaud : par
3792 exemple, sélectionner et étudier les événements les plus sévères pour chaque modèle
3793 (cf. Figure 5.1 pour le modèle CNRM-AROME) permettraient d'étudier une gamme
3794 d'événements méditerranéens extrêmes futurs et leurs différentes caractéristiques.

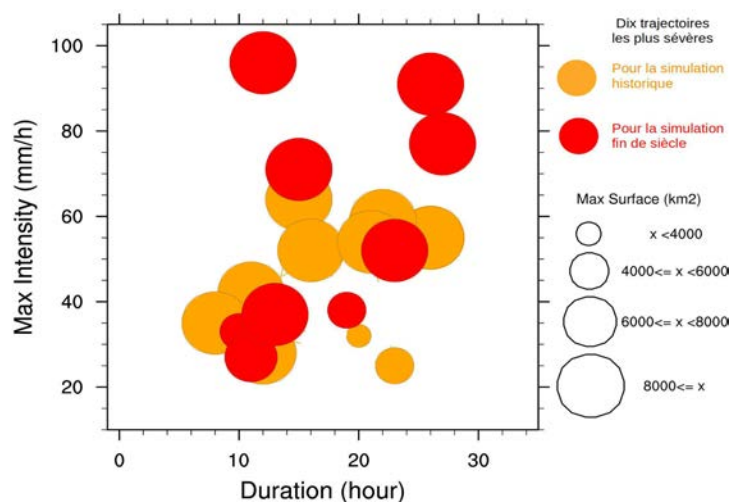


FIGURE 5.1 – Graphique à bulles des 10 trajectoires les plus sévères pour la période historique (en orange) et pour la période fin de siècle (en rouge) pour CNRM-AROME

3795 Toutefois, si cette méthode présente l'intérêt d'illustrer des possibles, la robustesse
 3796 des résultats est limitée par le nombre de cas choisis et la méthode de sélection.

3797 • l'approche "Pseudo Global Warming"

3798 L'approche PGW est utilisée par plusieurs groupes en Europe et surtout aux Etats-
 3799 Unis (Schär et al, 1996; Rasmussen et al, 2011; Prein et al, 2017; Brogli et al, 2023).
 3800 Cette approche consiste à imposer directement des changements de grande échelle à
 3801 une simulation de CP-RCM de contrôle (généralement une simulation d'évaluation
 3802 forcée par des réanalyses) en modifiant les conditions aux limites. Ces conditions aux
 3803 limites sont modifiées par l'ajout d'anomalies mensuelles pour différentes variables et
 3804 à tous les niveaux verticaux (température, humidité relative, vent, pression, SST...)
 3805 calculées à partir des différences entre les simulations historique et scénario d'un
 3806 ou de plusieurs GCMs. Cette approche présente l'avantage de limiter le nombre de
 3807 simulations, et donc les coûts de calcul. Toutefois, elle ne permet pas ou peu de
 3808 prendre en compte les changements éventuels de circulation générale proposés par
 3809 les GCMs et conserve la variabilité interannuelle de la simulation de contrôle. La
 3810 réalité physique des simulations peut également être questionnée. L'application de
 3811 cette méthode sur les Antilles dans le cadre du projet européen EUCP³ a montré
 3812 que certains cyclones présents dans les simulations d'évaluation disparaissaient dans
 3813 les simulations PGW futures en raison d'une stabilisation de l'atmosphère. De même,
 3814 Matte et al (2022) ont dû modifier et simplifier la méthode de PGW afin de reproduire
 3815 un événement convectif extrême sur la ville de Copenhague dans un climat plus chaud.
 3816 Cette approche n'est pas envisagée pour la suite de cette thèse.

3. <https://eucp-project.github.io/storyboards/caribbean>

- 3817 • la combinaison des approches par études de cas et PGW
- 3818 Les deux approches précédentes peuvent être combinées : ainsi, Margot Bador du
- 3819 CERFACS s'intéresse à la futurisation d'événements extrêmes observés, en rejouant
- 3820 ces événements avec CNRM-AROME dans un climat plus chaud et avec, comme
- 3821 premier cas d'étude, l'épisode méditerranéen des 2-3 octobre 2020 sur les Alpes-
- 3822 Maritimes.
- 3823 • l'approche en "storyline" ou scénario
- 3824 Comme le choix du GCM représente a priori la source majeure d'incertitude dans
- 3825 les projections futures pour les pluies et qu'il est impossible d'explorer cette incerti-
- 3826 tude de manière exhaustive avec des CP-RCMs, il peut être pertinent de mettre en
- 3827 place une approche dite en "storyline" (Zappa and Shepherd, 2017; Shepherd, 2019)
- 3828 (cf. Figure 5.2). Il s'agit ici de choisir "intelligemment" des GCMs particuliers pour
- 3829 sous-échantillonner l'incertitude, en appliquant, par exemple, un algorithme de clas-
- 3830 sification comme celui décrit dans Nuissier et al (2011) qui permettra d'indiquer,
- 3831 pour chaque GCM, l'évolution future des configurations favorables aux épisodes mé-
- 3832 diterranéens. Des GCMs représentatifs de différents scénarios d'évolution possibles
- 3833 sont choisis, chacun représentant une histoire plausible du climat futur. Une descente
- 3834 d'échelle dynamique est ensuite effectuée avec un CP-RCM afin d'obtenir l'illustra-
- 3835 tion à haute résolution spatio-temporelle d'un futur plausible des épisodes méditerra-
- 3836 néens. Cette approche permettra d'obtenir des ensembles mieux construits et pourra
- 3837 également répondre à des besoins particuliers comme, par exemple, l'illustration du
- 3838 "scénario du pire".

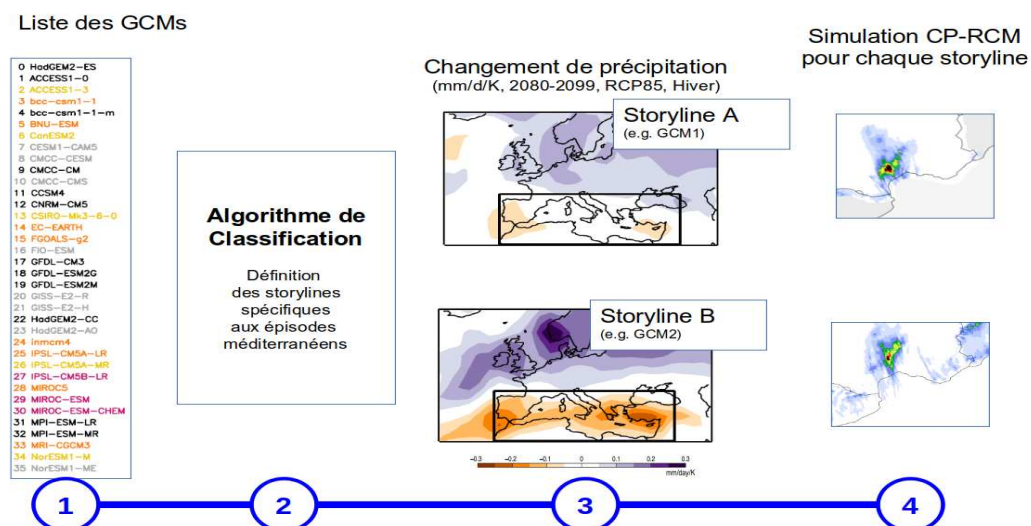


FIGURE 5.2 – Illustration de l'approche "storyline". Communication personnelle S. Somot. D'après Zappa and Shepherd (2017); Shepherd (2019)

3839 Cette approche s'inscrit dans une démarche proche de celle que j'ai adoptée dans

3840 mon étude sur l'évolution future des épisodes méditerranéens : au lieu de s'intéresser

3841 à la moyenne de l'ensemble qui n'a pas de réalité physique et peut cacher des diver-

3842 gences, chaque simulation est considérée individuellement comme un futur possible.

3843 L'approche en "storyline" pour choisir les GCMs permettra de mieux échantillonner
3844 les possibles, mais aussi de s'adapter aux demandes spécifiques d'information clima-
3845 tique.

- 3846 • L'approche par descente d'échelle hybride type émulateur

3847 Le coût des simulations à résolution kilométrique motive également la mise en place
3848 d'autres approches novatrices, combinant intelligence artificielle et modélisation cli-
3849 matique, afin de multiplier les simulations et d'augmenter la taille des ensembles de
3850 CP-RCMs à moindre coût. Ainsi, de nouvelles techniques hybrides sont développées,
3851 utilisant des méthodes de descente d'échelle statistique basées sur de l'apprentis-
3852 sage machine à partir de simulations réalisées par descente d'échelle dynamique. Au
3853 CNRM, Antoine Doury a ainsi mis au point un émulateur du RCM CNRM-ALADIN
3854 dans le cadre de sa thèse (Doury, 2022) avec de très bons résultats pour les tem-
3855 pératures (Doury et al, 2022), mais également les précipitations (cf. Figure 5.3). Un
3856 émulateur du CP-RCM CNRM-AROME est en cours de développement. Il faut noter
3857 que cette approche est complémentaire de la descente d'échelle dynamique puisqu'elle
3858 a besoin de ces simulations comme base d'apprentissage.

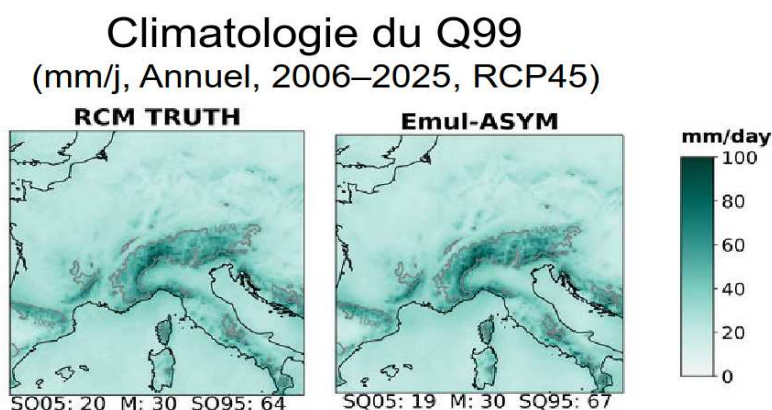


FIGURE 5.3 – Comparaison des percentiles 99% annuels de précipitation quotidienne simulés par le RCM CNRM-ALADIN forcé par CNRM-CM5 et par l'émulateur pour le scénario RCP4.5, après apprentissage sur une paire HIST/RCP85 de CNRM-CM5/CNRM-ALADIN. Communication personnelle A. Doury

3859 5.3.4.5 La poursuite de la coordination internationale

3860 Le programme du CORDEX-FPS Convection sur l'Europe et la Méditerranée a permis
3861 la mise en place d'un ensemble unique de simulations avec des CP-RCMs sur le domaine
3862 commun pan-alpin. Cette initiative a permis de nombreuses études et en permettra en-
3863 core de nouvelles avec le partage des données des simulations en cours de publication sur
3864 l'ESGF. Mais ce programme s'est terminé fin 2022. Dans le cadre de CORDEX, d'autres
3865 FPS utilisant des CP-RCMs se mettent en place dans le monde. Il n'y a pas encore de co-
3866 ordination à l'échelle mondiale de ces FPS, mais des réflexions sont en cours. La poursuite
3867 d'une coordination internationale ou au moins européenne est indispensable pour continuer
3868 à produire des ensembles de CP-RCMs.

3869 5.4 Pour prolonger l'étude des événements extrêmes 3870 méditerranéens

3871 Tout au long de la thèse, un focus est fait sur les épisodes méditerranéens touchant
3872 le sud-est de la France, zone pour laquelle nous disposons des observations fiables. La
3873 définition d'autres zones, connues pour être affectées par les épisodes méditerranéens de
3874 l'automne, comme la Ligurie italienne, ou nouvellement affectées, pourrait permettre de
3875 déterminer si les changements de caractéristiques sont les mêmes partout sur le nord-ouest
3876 de la Méditerranée.

3877 L'éventuel changement de saisonnalité des épisodes méditerranéens en réponse au chan-
3878 gement climatique n'a pas été abordé dans cette thèse, mais le tracking ayant été réalisé
3879 sur toute l'année, cette perspective pourra être réalisée dans un futur proche.

3880 La sélection des systèmes convectifs a été faite à partir du champ de précipitation
3881 horaire et avec un critère de 10 mm/h, soit des précipitations déjà fortes : ainsi, dans les
3882 trajectoires étudiées, les phases précédant et suivant la phase fortement pluvieuse, comme
3883 la phase de développement du nuages d'orage et la phase de déclin, ne sont donc pas
3884 étudiées et le cycle de vie du système convectif n'est donc pas complet. Pour prendre en
3885 compte tout le cycle de vie, on pourrait simplement modifier la sélection des trajectoires
3886 (critère de maximum d'intensité au cours de la trajectoire) ou encore appliquer l'algorithme
3887 de détection et de suivi à d'autres variables comme les images infra-rouge simulées par le
3888 modèle qui n'étaient pas en sortie des simulations existantes avec CNRM-AROME, mais
3889 le seront dans les prochaines simulations.

3890 L'approche objet dans les simulations de modèles à résolution kilométrique peut éga-
3891 lement s'appliquer pour étudier l'évolution future d'autres phénomènes extrêmes médi-
3892 terranéens. Par exemple, la méthode de détection des échos arqués mise en place pour
3893 la prévision d'ensemble AROME en PNT (Mounier et al, 2022) pourrait être appliquée
3894 aux simulations de l'ensemble du FPS Convection. De même, à condition d'agrandir un
3895 peu le domaine pan-alpin, au mieux jusqu'à couvrir toute la Méditerranée, l'étude des
3896 phénomènes extrêmes méditerranéens pourrait être complétée par l'étude des "medicane"
3897 (contraction de Mediterranean et Hurricane), ces dépressions intenses des moyennes lati-
3898 tudes qui se creusent en Méditerranée et présentent un coeur chaud comme les cyclones
3899 tropicaux (Flaounas et al, 2022). Ce type de phénomène nécessite lui-aussi des modèles
3900 à haute résolution pour être correctement simulé : un ensemble de simulations de CP-
3901 RCMs en climat présent et futur forcées par des GCMs "intelligemment" choisis, associé
3902 à une approche lagrangienne de tracking de dépression (Sanchez-Gomez and Somot, 2016;
3903 Flaounas et al, 2021) permettrait d'apporter des réponses sur les changements de ces phé-
3904 nomènes extrêmes dans un climat plus chaud. Des simulations sur un domaine couvrant
3905 toute la Méditerranée permettraient également d'étendre l'étude des événements extrêmes
3906 de pluie à l'ensemble de bassin et en particulier à la rive sud de la Méditerranée, parti-
3907 culièrement vulnérable à ce type d'événement comme l'a montré la catastrophe liée à la
3908 tempête Daniel sur la Libye en septembre 2023.

5.5 L'utilisation des CP-RCMs pour les services climatiques ?

Remplacer complètement les simulations des RCMs par celles venant de CP-RCMs pour alimenter les services climatiques n'est pas d'actualité. La taille des ensembles et la longueur des simulations ne le permettent pas.

Pourtant, ces simulations permettent de produire de nouvelles informations qui viendront répondre à des demandes d'utilisateurs qui, jusqu'à présent, ne pouvaient pas être satisfaites (ex : orage, grêle, rafales de vent, ...).

De même, il y a de fortes attentes de la communauté des impacts pour que les données issues des modèles à haute résolution soient utilisées en entrée de modèles d'impact. Ainsi, l'utilisation des données à haute résolution des CP-RCMs pour forcer des modèles hydrologiques est prometteuse (Poncet et al, 2023), même si des corrections de biais restent nécessaires, et permettra d'apporter de nouvelles réponses sur l'évolution des crues rapides méditerranéennes.

Afin d'alimenter les services climatiques, des réflexions sont engagées pour définir des méthodologies qui permettront de prendre en compte et de combiner les différentes sources d'informations climatiques venant des CP-RCMs, des RCMs, des GCMs, des GCMs corrigés par contraintes observationnelles ou encore des émulateurs. Ces réflexions pourront s'appuyer sur le projet RifS (Regional Information for Society) du WCRP dont l'objectif est de s'attaquer aux défis posés par la réconciliation et l'intégration de multiples sources d'information sur le climat (distillation) afin de produire des connaissances adaptées au contexte pour les décideurs.

Des projets comme IMPETUS4CHANGE⁴ ou le programme TRACCS⁵ dans lesquels le CNRM est engagé, cherchent, face aux demandes sociétales fortes, à permettre le développement de services climatiques, co-construits avec les parties prenantes, afin de prendre en compte au mieux les besoins. Ils permettront de réfléchir aux différents moyens pour utiliser au mieux les informations climatiques aux échelles locales fournies par les CP-RCMs en les combinant aux autres informations disponibles.

4. Projet européen IMPETUS4CHANGE (<https://impetus4change.eu/>) (2022/2026) qui vise à améliorer la qualité, l'accessibilité et l'utilisation des informations et des services climatiques à court terme (d'ici 2030) à l'échelle locale et régionale, avec un focus sur les villes (démonstrateurs sur Paris, Barcelone, Prague et Bergen). Dans ce projet, un ensemble de quatre simulations de CP-RCM couvrira la France métropolitaine.

5. TRAnsformer la modélisation du Climat pour les services ClimatiqueS - Programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) France2030 - <https://climeri-france.fr/pepr-traccs/> - porté par le CNRS et Météo-France

3937 5.6 Vers des modèles globaux à résolution kilomé- 3938 trique en climat ?

3939 L'augmentation de la puissance de calcul a permis l'augmentation de résolution des
3940 modèles globaux de PNT (par exemple, 5 km sur la France et 24 km aux antipodes pour
3941 ARPEGE). Dans le même temps, des initiatives se mettent en place pour réaliser des
3942 simulations plus longues avec des modèles globaux à résolution kilométrique.

3943 Ainsi, le projet DYAMOND⁶ (Stevens et al., 2019) a réuni neuf modèles atmosphériques
3944 globaux, dont huit ont une résolution inférieure à 5 km, pour une période estivale d'inter-
3945 comparaison de 40 jours. Le modèle ARPEGE non-hydrostatique à 2.5 km et sans schéma
3946 de convection profonde a représenté Météo-France pour cet exercice. La deuxième phase
3947 concerne une période hivernale de 40 jours et préconise l'utilisation de modèles couplés.

3948 Ces exercices montrent la faisabilité technique de telles simulations et ouvrent la porte
3949 à l'utilisation de ce type de modèle pour des simulations longues de climat. D'après Palmer
3950 (2014) ou Slingo et al (2022), ces modèles sont indispensables pour d'obtenir des informa-
3951 tions fiables aux échelles régionales et locales. L'initiative européenne Destination Earth⁷
3952 vise à développer, d'ici 2030, un jumeau numérique de la Terre pour modéliser, surveiller
3953 et simuler les phénomènes naturels, les risques et les activités humaines qui y sont liées,
3954 et notamment réaliser de longues simulations climatiques avec les modèles ICON et IFS à
3955 résolution kilométrique.

3956 Les simulations climatiques sur le globe à résolution kilométrique présentent, en effet,
3957 plusieurs intérêts. En plus de présenter tous les avantages des CP-RCMs, notamment pour
3958 la simulation des systèmes convectifs, elles permettent les rétroactions entre les phénomènes
3959 de petite échelle et de grande échelle et enlèvent la problématique des conditions aux
3960 limites des modèles régionaux de climat, source d'erreur. Enfin, à condition de tourner
3961 suffisamment rapidement, elles permettent de résoudre le problème d'arrivée tardive des
3962 simulations régionales car elles peuvent être lancées dès la mise à disposition des scénarios
3963 d'évolution de GES, sans attendre que les simulations des GCMs, puis des RCMs soient
3964 réalisées et validées.

3965 Toutefois, afin d'atteindre les objectifs fixés, les simulations globales à résolution ki-
3966 lométrique doivent être définies avec soin. Pour cela, il faut espérer que cette nouvelle
3967 communauté tire partie de l'expérience en modélisation à haute résolution de la PNT,
3968 mais aussi de celles de la modélisation globale et régionale du climat. Les choix de résolu-
3969 tion horizontale afin d'éviter la zone grise de la convection, du nombre et de la répartition
3970 des niveaux verticaux, des paramétrisations et de leur réglage, et l'ajout des différentes
3971 composantes du système climatique à des résolutions adaptées à la résolution du modèle
3972 atmosphérique, sont autant de choix qui vont impacter la qualité des réponses données. Ces
3973 différents choix sont contraints par des coûts numériques acceptables, mais doivent aussi
3974 tenir compte des enjeux de sobriété énergétique. Enfin, comme cela a été mis en évidence
3975 au cours de cette thèse pour les extrêmes de précipitations ou dans les premières études
3976 sur l'ensemble DYAMOND comme Feng et al (2023) qui montrent des différences notables

6. DYnamics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains

7. DestinE - <https://destination-earth.eu/>

3977 sur la simulation des MCSs tropicaux, l'amélioration et le développement des modèles à
3978 résolution kilométrique doivent être poursuivis. La diversité des modèles doit également
3979 être préservée, ce qui n'est pas garanti car le coût numérique et la complexité des sys-
3980 tèmes tendent à réduire le nombre d'instituts et donc de modèles pouvant participer à ces
3981 expériences.

3982 Avec des capacités numériques grandissantes, l'arrivée de nouvelles architectures de
3983 calcul plus efficaces (GPU), de l'intelligence artificielle, mais aussi la prise de conscience
3984 de l'empreinte carbone des simulations, le domaine de la modélisation climatique est en
3985 constante évolution.

3986 Si la recherche doit se poursuivre pour mettre au point des modèles globaux à résolution
3987 kilométrique, on est encore toutefois loin de disposer de grands ensembles avec ce type de
3988 modèles. L'utilisation des modèles régionaux de climat à résolution kilométrique a donc
3989 encore toute sa place.

3990 Il a été, en effet, montré au cours de cette thèse que les CP-RCMs sont les outils de mo-
3991 délisation adaptés pour l'étude des extrêmes de précipitation méditerranéens. Les résultats
3992 déjà obtenus pour caractériser l'évolution future de ces phénomènes contribuent à améliorer
3993 la connaissance des effets du changement climatique sur les régions méditerranéennes qui
3994 sont déjà touchées par le réchauffement climatique. En poursuivant les efforts pour amé-
3995 liorer les modèles et produire des ensembles de CP-RCMs plus larges et mieux construits,
3996 forcés par des modèles globaux Système Terre de plus en plus complets et performants, la
3997 modélisation régionale à haute résolution continuera, dans les prochaines années, à appor-
3998 ter des informations climatiques utiles, c'est-à-dire pertinentes au regard des besoins de la
3999 société et pour la mise en place de politique d'adaptation, jusqu'aux échelles régionales et
4000 locales.

Bibliographie

- Adinolfi M, Raffa M, Reder A, Mercogliano P (2021) Evaluation and expected changes of summer precipitation at convection permitting scale with COSMO-CLM over alpine space. *Atmosphere* 12(1) :54, URL <https://doi.org/10.3390/atmos12010054>
- Ali E, Cramer W, Carnicer J, Georgopoulou E, Hilmi N, Le Cozannet G, Lionello P (2022) Cross-chapter paper 4 : Mediterranean region. IPCC, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA pp 2233–2272
- Ammann CM, Joos F, Schimel DS, Otto-Bliesner BL, Tomas RA (2007) Solar influence on climate during the past millennium : Results from transient simulations with the NCAR Climate System Model. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104(10) :3713–3718, URL <https://doi.org/10.1073/pnas.0605064103>
- Anagnostou MN, Nikolopoulos EI, Kalogiros J, Anagnostou EN, Marra F, Mair E, Bertoldi G, Tappeiner U, Borga M (2018) Advancing precipitation estimation and streamflow simulations in complex terrain with X-band dual-polarization radar observations. *Remote Sensing* 10(8) :1258, URL <https://doi.org/10.3390/rs10081258>
- Baldauf M, Seifert A, Förstner J, Majewski D, Raschendorfer M, Reinhardt T (2011) Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model : Description and sensitivities. *Monthly Weather Review* 139(12) :3887–3905, URL <https://doi.org/10.1175/MWR-D-10-05013.1>
- Ban N, Schmidli J, Schär C (2014) Evaluation of the convection-resolving regional climate modeling approach in decade-long simulations. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 119(13) :7889–7907, URL <https://doi.org/10.1002/2014JD021478>
- Ban N, Schmidli J, Schär C (2015) Heavy precipitation in a changing climate : Does short-term summer precipitation increase faster ? *Geophysical Research Letters* 42(4) :1165–1172, URL <https://doi.org/10.1002/2014GL062588>
- Ban N, Rajczak J, Schmidli J, Schär C (2020) Analysis of alpine precipitation extremes using generalized extreme value theory in convection-resolving climate simulations. *Climate Dynamics* 55 :61–75, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4339-4>
- Ban N, Caillaud C, Coppola E, Pichelli E, Sobolowski S, Adinolfi M, Ahrens B, Anders I, Bastin S, Belusic D, Berthou S, et al (2021) The first multi-model ensemble of regional

climate simulations at kilometer-scale resolution, part I : Evaluation of precipitation. *Climate Dynamics* URL <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05708-w>

Beaulant AL, Joly B, Nuissier O, Somot S, Ducrocq V, Joly A, Sevault F, Deque M, Ricard D (2011) Statistico-dynamical downscaling for mediterranean heavy precipitation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137(656) :736–748, URL <https://doi.org/10.1002/qj.796>

Bechtold P, Cuijpers J, Mascart P, Trouilhet P (1995) Modeling of trade wind cumuli with a low-order turbulence model : Toward a unified description of Cu and Se clouds in meteorological models. *Journal of the atmospheric sciences* 52(4) :455–463, URL [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1995\)052<0455:MOTWCW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1995)052<0455:MOTWCW>2.0.CO;2)

Beguiría S, Vicente-Serrano SM, Tomás-Burguera M, Maneta M (2016) Bias in the variance of gridded data sets leads to misleading conclusions about changes in climate variability. *International Journal of Climatology* 36(9) :3413–3422, URL <https://doi.org/10.1002/joc.4561>

Belamari S, Pirani A (2007) Validation of the optimal heat and momentum fluxes using the ORCA2-LIM global ocean-ice model. *Marine Environment and Security for the European Area-Integrated Project (MERSEA IP)*, Deliverable D 4

Belušić D, de Vries H, Dobler A, Landgren O, Lind P, Lindstedt D, Pedersen RA, Sánchez-Perrino JC, Toivonen E, van Uft B, et al (2020) HCLIM38 : A flexible regional climate model applicable for different climate zones from coarse to convection permitting scales. *Geosci Model Dev* URL <https://doi.org/10.5194/gmd-13-1311-2020>

Bénard P, Vivoda J, Mašek J, Smolíková P, Yessad K, Smith C, Brožková R, Geleyn JF (2010) Dynamical kernel of the aladin-NH spectral limited-area model : Revised formulation and sensitivity experiments. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 136(646) :155–169, URL <https://doi.org/10.1002/qj.522>

Berg P, Christensen OB, Klehmet K, Lenderink G, Olsson J, Teichmann C, Yang W (2019) Summertime precipitation extremes in a EURO-CORDEX 0.11 degrees ensemble at an hourly resolution. *Natural hazards and earth system sciences* 19(4) :957–971, URL <https://doi.org/10.5194/nhess-19-957-2019>

Berthou S, Mailler S, Drobinski P, Arsouze T, Bastin S, Béranger K, Lebeaupin-Brossier C (2014) Prior history of Mistral and Tramontane winds modulates heavy precipitation events in southern France. *Tellus A : Dynamic Meteorology and Oceanography* 66(1) :24,064, URL <https://doi.org/10.3402/tellusa.v66.24064>

Berthou S, Mailler S, Drobinski P, Arsouze T, Bastin S, Béranger K, Lebeaupin-Brossier C (2015) Sensitivity of an intense rain event between atmosphere-only and atmosphere-ocean regional coupled models : 19 september 1996. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 141(686) :258–271, URL <https://doi.org/10.1002/qj.2355>

- Berthou S, Mailler S, Drobinski P, Arsouze T, Bastin S, Béranger K, Flaounas E, Lebeau-pin Brossier C, Somot S, Stéfanon M (2016) Influence of submonthly air–sea coupling on heavy precipitation events in the Western Mediterranean basin. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 142 :453–471, URL <https://doi.org/10.1002/qj.2717>
- Berthou S, Kendon EJ, Chan SC, Ban N, Leutwyler D, Schär C, Fossier G (2020) Pan-european climate at convection-permitting scale : a model intercomparison study. *Climate Dynamics* 55 :35–59, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4114-6>
- Berthou S, Roberts MJ, Vannièrè B, Ban N, Belušić D, Caillaud C, Crocker T, de Vries H, Dobler A, Harris D, et al (2022) Convection in future winter storms over Northern Europe. *Environmental Research Letters* 17(11) :114,055, URL <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aca03a>
- Beucher F, Lafore JP, Karbou F, Roca R (2014) High-resolution prediction of a major convective period over West Africa. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 140(682) :1409–1425, URL <https://doi.org/10.1002/qj.2225>
- Blanchet J, Creutin JD (2022) Instrumental agreement and retrospective analysis of trends in precipitation extremes in the French Mediterranean Region. *Environmental Research Letters* 17(7) :074,011, URL <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac7734>
- Blanchet J, Molinié G, Touati J (2018) Spatial analysis of trend in extreme daily rainfall in southern France. *Climate dynamics* 51(3) :799–812, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3122-7>
- Bosilovich MG, Chen J, Robertson FR, Adler RF (2008) Evaluation of global precipitation in reanalyses. *Journal of applied meteorology and climatology* 47(9) :2279–2299, URL <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1921.1>
- Boudevillain B, Argence S, Claude C, Ducrocq V, Joly B, Joly A, Lambert D, Nuissier O, Plu M, Ricard D, et al (2009) Cyclogenèses et précipitations intenses en région méditerranéenne : origines et caractéristiques (projet cyprim, partie i). *Météorologie* (66) :18–28
- Bougeault P (1982) Cloud-ensemble relations based on the gamma probability distribution for the higher-order models of the planetary boundary layer. *Journal of the Atmospheric Sciences* 39(12) :2691–2700, URL [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1982\)039<2691:CERBOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1982)039<2691:CERBOT>2.0.CO;2)
- Bougeault P (1985) A simple parameterization of the large-scale effects of cumulus convection. *Monthly Weather Review* 113(12) :2108–2121, URL [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1985\)113<2108:ASPOTL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1985)113<2108:ASPOTL>2.0.CO;2)
- Bougeault P, Lacarrère P (1989) Parameterization of Orography–Induced Turbulence in a Mesobeta–Scale Model. *Monthly Weather Review* 117(8) :1872–1890, URL [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1872:P00ITI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1872:P00ITI>2.0.CO;2)

- Bouin MN, Lebeau-pin Brossier C, Malardel S, Voltaire A, Sauvage C (2023) The wave-age dependent stress parameterization (WASP) for momentum and heat turbulent fluxes at sea in SURFEX v8. 1. *Geoscientific Model Development Discussions* 2023 :1–46, URL <https://doi.org/10.5194/gmd-2023-58>
- Bouteloup Y, Seity Y, Bazile E (2011) Description of the sedimentation scheme used operationally in all Météo-France NWP models. *Tellus A* 63(2) :300–311, URL <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2010.00484.x>
- Bresson E, Ducrocq V, Nuissier O, Ricard D, de Saint-Aubin C (2012) Idealized numerical simulations of quasi-stationary convective systems over the Northwestern Mediterranean complex terrain. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 138(668) :1751–1763, URL <https://doi.org/10.1002/qj.1911>
- Bresson R, Ricard D, Ducrocq V (2009) Idealized mesoscale numerical study of Mediterranean heavy precipitating convective systems. *Meteorology and atmospheric physics* 103(1-4) :45–55, URL <https://doi.org/10.1007/s00703-008-0338-z>
- Brigode P, Gérardin M, Bernardara P, Gailhard J, Ribstein P (2018) Changes in French weather pattern seasonal frequencies projected by a CMIP5 ensemble. *International Journal of Climatology* 38(10) :3991–4006, URL <https://doi.org/10.1002/joc.5549>
- Brisson E, Van Weverberg K, Demuzere M, Devis A, Saeed S, Stengel M, van Lipzig NP (2016) How well can a convection-permitting climate model reproduce decadal statistics of precipitation, temperature and cloud characteristics? *Climate Dynamics* 47(9-10) :3043–3061, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3012-z>
- Brisson E, Brendel C, Herzog S, Ahrens B (2018) Lagrangian evaluation of convective shower characteristics in a convection-permitting model. *Meteorologische Zeitschrift* pp 59–66, URL <https://doi.org/10.1127/metz/2017/0817>
- Brogli R, Heim C, Mensch J, Sørland SL, Schär C (2023) The pseudo-global-warming (PGW) approach : methodology, software package PGW4ERA5 v1. 1, validation, and sensitivity analyses. *Geoscientific Model Development* 16(3) :907–926, URL <https://doi.org/10.5194/gmd-16-907-2023>
- Brousseau P, Seity Y, Ricard D, Léger J (2016) Improvement of the forecast of convective activity from the AROME-France system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 142(699) :2231–2243, URL <https://doi.org/10.1002/qj.2822>
- Caillaud C, Somot S, Alias A, Bernard-Bouissières I, Fumière Q, Laurantin O, Seity Y, Ducrocq V (2021) Modelling mediterranean heavy precipitation events at climate scale : an object-oriented evaluation of the CNRM-AROME convection-permitting regional climate model. *Climate Dynamics* pp 1–36, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05558-y>

- Carabajal CC, Harding DJ, Boy JP, Danielson JJ, Gesch DB, Suchdeo VP (2011) Evaluation of the global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010) using ICESat geodetic control. In : International Symposium on Lidar and Radar Mapping 2011 : Technologies and Applications, International Society for Optics and Photonics, vol 8286, p 82861Y, URL <https://doi.org/10.1117/12.912776>
- Chan SC, Kendon EJ, Berthou S, Fosser G, Lewis E, Fowler HJ (2020) Europe-wide precipitation projections at convection permitting scale with the Unified Model. *Climate Dynamics* 55 :409–428, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05192-8>
- Chan SC, Kendon EJ, Fowler HJ, Kahraman A, Crook J, Ban N, Prein AF (2023) Large-scale dynamics moderate impact-relevant changes to organised convective storms. *Communications Earth & Environment* 4(1) :8, URL <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00669-2>
- Charnock H (1955) Wind stress on a water surface. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 81(350) :639–640, URL <https://doi.org/10.1002/qj.49708135027>
- Chochon R, Martin N, Lebourg T, Vidal M (2022) Analysis of extreme precipitation during the mediterranean event associated with the Alex storm in the Alpes-Maritimes : atmospheric mechanisms and resulting rainfall. In : *Advances in Hydroinformatics : Models for Complex and Global Water Issues—Practices and Expectations*, Springer, pp 397–418
- Colin J (2011) Etude des événements précipitants intenses en Méditerranée : approche par la modélisation climatique régionale. PhD thesis, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier
- Colin J, Déqué M, Radu R, Somot S (2010) Sensitivity study of heavy precipitation in Limited Area Model climate simulations : influence of the size of the domain and the use of the spectral nudging technique. *Tellus A* 62(5) :591–604, URL <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2010.00467.x>
- Coppola E, Sobolowski S, Pichelli E, Raffaele F, Ahrens B, Anders I, Ban N, Bastin S, Belda M, Belusic D, et al (2020) A first-of-its-kind multi-model convection permitting ensemble for investigating convective phenomena over Europe and the Mediterranean. *Climate Dynamics* 55 :3–34, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4521-8>
- Coppola E, Nogherotto R, Ciarlo JM, Giorgi F, van Meijgaard E, Kadygrov N, Iles C, Corre L, Sandstad M, Somot S, Nabat P, Vautard R, et al (2021a) Assessment of the European Climate Projections as Simulated by the Large EURO-CORDEX Regional and Global Climate Model Ensemble. *JGR Atmospheres* URL <https://doi.org/10.1029/2019JD032344>
- Coppola E, Stocchi P, Pichelli E, Torres Alavez JA, Glazer R, Giuliani G, Di Sante F, Nogherotto R, Giorgi F (2021b) Non-Hydrostatic RegCM4 (RegCM4-NH) : model description and case studies over multiple domains. *Geoscientific Model Development* 14(12) :7705–7723, URL <https://doi.org/10.5194/gmd-14-7705-2021>

- Cornes RC, van der Schrier G, van den Besselaar EJ, Jones PD (2018) An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 123(17) :9391–9409, URL <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>
- Cortés Hernandez VE, Caillaud C, Bellon G, Brisson E, Alias A, Lucas-Picher P (2023) Evaluation of the Convection Permitting Regional Climate Model CNRM-AROME on the complex orographic island of Corsica. *Climate Dynamics* p Submitted, URL <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3334437/v1>
- Couvreux F, Hourdin F, Williamson D, Roehrig R, Volodina V, Villefranque N, Rio C, Audouin O, Salter J, Bazile E, et al (2021) Process-based climate model development harnessing machine learning : I. A calibration tool for parameterization improvement. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 13(3) :e2020MS002,217, URL <https://doi.org/10.1029/2020MS002217>
- Cramer W, Guiot J, Marini K, Azzopardi B, Balzan MV, Cherif S, Doblas-Miranda E, Dos Santos MJPL, Drobinski P, Fader M, et al (2020) Medecc 2020 summary for policymakers. *Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin—Current Situation and Risks for the Future First Mediterranean Assessment Report* pp 11–40, URL <https://doi.org/10.5281/zenodo.5513887>
- Crook J, Klein C, Folwell S, Taylor CM, Parker DJ, Stratton R, Stein T (2019) Assessment of the representation of West African storm lifecycles in convection-permitting simulations. *Earth and Space Science* 6(5) :818–835, URL <https://doi.org/10.1029/2018EA000491>
- Cuxart J, Bougeault P, Redelsperger JL (2000) A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 126(562) :1–30, URL <https://doi.org/10.1002/qj.49712656202>
- Darmaraki S, Somot S, Sevault F, Nabat P (2019) Past variability of Mediterranean Sea marine heatwave. *Geophysical Research Letters* 46(16) :9813–9823, URL <https://doi.org/10.1029/2019GL082933>
- Davis C, Brown B, Bullock R (2006) Object-based verification of precipitation forecasts. Part I : Methodology and application to mesoscale rain areas. *Monthly Weather Review* 134(7) :1772–1784, URL <https://doi.org/10.1175/MWR3145.1>
- Davis CA, Brown BG, Bullock R, Halley-Gotway J (2009) The method for object-based diagnostic evaluation (MODE) applied to numerical forecasts from the 2005 NSSL/SPC Spring Program. *Weather and Forecasting* 24(5) :1252–1267, URL <https://doi.org/10.1175/2009WAF2222241.1>
- Decharme B, Boone A, Delire C, Noilhan J (2011) Local evaluation of the Interaction between Soil Biosphere Atmosphere soil multilayer diffusion scheme using four pedotransfer functions. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 116(D20), URL <https://doi.org/10.1029/2011JD016002>

- Dee DP, Uppala S, Simmons A, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balmaseda M, Balsamo G, Bauer dP, et al (2011) The ERA-Interim reanalysis : Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society* 137(656) :553–597, URL <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- Di Luca A, de Elía R, Laprise R (2012) Potential for small scale added value of RCM’s downscaled climate change signal. *Climate Dynamics* 40(3-4) :601–618, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1415-z>
- Di Luca A, Argüeso D, Evans JP, de Elía R, Laprise R (2016) Quantifying the overall added value of dynamical downscaling and the contribution from different spatial scales. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 121(4) :1575–1590, URL <https://doi.org/10.1002/2015JD024009>
- Doblas-Reyes F, Sörensson A, Almazroui M, Dosio A, Gutowski W, Haarsma R, Hamdi R, Hewitson B, Kwon W, Lamptey B, et al (2021) Linking global to regional climate change climate change 2021 : The physical science basis. contribution of working group i to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change
- Doury A (2022) Estimation robuste du changement climatique régional : construction d’une approche hybride entre réseaux de neurones profonds et modèles de climat. PhD thesis, Université Toulouse I
- Doury A, Somot S, Gadat S, Ribes A, Corre L (2022) Regional climate model emulator based on deep learning : concept and first evaluation of a novel hybrid downscaling approach. *Climate Dynamics* pp 1–29, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06343-9>
- Douville H, Royer JF, Mahfouf JF (1995) A new snow parameterization for the Meteo-France climate model. *Climate Dynamics* 12(1) :21–35, URL <https://doi.org/10.1007/BF00208760>
- Drobinski P, Ducrocq V, Alpert P, Anagnostou E, Béranger K, Borga M, Braud I, Chanzy A, Davolio S, Delrieu G, et al (2014) HyMeX : A 10-year multidisciplinary program on the Mediterranean water cycle. *Bulletin of the American Meteorological Society* 95(7) :1063–1082, URL <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00242.1>
- Ducrocq V (2020) Prédiction des précipitations extrêmes et des crues rapides
- Ducrocq V, Ricard D, Lafore JP, Orain F (2002) Storm-scale numerical rainfall prediction for five precipitating events over France : On the importance of the initial humidity field. *Weather and Forecasting* 17(6) :1236–1256, URL [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2002\)017<1236:SSNRPF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2002)017<1236:SSNRPF>2.0.CO;2)
- Ducrocq V, Aullo G, Santurette P (2003) Les précipitations intenses et les inondations des 12 et 13 novembre 1999 sur le sud de la France. *La Météorologie* 2003(42) :18–27, URL <https://doi.org/10.4267/2042/36293>

- Ducrocq V, Nuissier O, Ricard D, Lebeau-pin C, Thouvenin T (2008) A numerical study of three catastrophic precipitating events over southern France. II : Mesoscale triggering and stationarity factors. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 134(630) :131–145, URL <https://doi.org/10.1002/qj.199>
- Ducrocq V, Braud I, Davolio S, Ferretti R, Flamant C, Jansa A, Kalthoff N, Richard E, Taupier-Letage I, Ayrat PA, et al (2014) HyMeX-SOP1 : The field campaign dedicated to heavy precipitation and flash flooding in the northwestern Mediterranean. *Bulletin of the American Meteorological Society* 95(7) :1083–1100, URL <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00244>
- Duffourg F, Ducrocq V (2011) Origin of the moisture feeding the Heavy Precipitating Systems over Southeastern France. *Natural hazards and earth system sciences* 11(4) :1163, URL <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1163-2011>
- Duffourg F, Ducrocq V (2013) Assessment of the water supply to Mediterranean heavy precipitation : a method based on finely designed water budgets. *Atmospheric Science Letters* 14(3) :133–138, URL <https://doi.org/10.1002/as12.429>
- Duffourg F, Nuissier O, Ducrocq V, Flamant C, Chazette P, Delanoë J, Doerenbecher A, Fourrié N, Di Girolamo P, Lac C, et al (2016) Offshore deep convection initiation and maintenance during the HyMeX IOP 16a heavy precipitation event. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 142(S1) :259–274, URL <https://doi.org/10.1002/qj.2725>
- Dufresne JL, Foujols MA, Denvil S, Caubel A, Marti O, Aumont O, Balkanski Y, Bekki S, Bellenger H, Benshila R, et al (2013) Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model : from CMIP3 to CMIP5. *Climate dynamics* 40 :2123–2165, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1>
- Durand Y, Brun E, Mérindol L, Guyomarc’h G, Lesaffre B, Martin E (1993) A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Annals of glaciology* 18 :65–71, URL <https://doi.org/10.3189/S0260305500011277>
- Déqué M, Somot S (2008) Analysis of heavy precipitation for France using high resolution ALADIN RCM simulations. *Időjárás Q J Hungarian Meteorological Service* 112(3-4) :179–190
- Déqué M, Alias A, Somot S, Nuissier O (2016) Climate change and extreme precipitation : the response by a convection-resolving model. *Research activities in atmospheric and oceanic modelling CAS/JSC Working group on numerical experimentation Report No46*
- Evin G, Somot S, Hingray B (2021) Balanced estimate and uncertainty assessment of European climate change using the large EURO-CORDEX regional climate model ensemble. *Earth System Dynamics* 12(4) :1543–1569, URL <https://doi.org/10.5194/esd-12-1543-2021>

- Fairall C, Bradley EF, Hare J, Grachev A, Edson J (2003) Bulk parameterization of air-sea fluxes : Updates and verification for the COARE algorithm. *Journal of climate* 16(4) :571–591, URL [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<0571:BPOASF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<0571:BPOASF>2.0.CO;2)
- Fantini A (2019) Climate change impact on flood hazard over Italy. PhD thesis, Università degli Studi di Trieste - URL <http://hdl.handle.net/11368/2940009>
- Fantini A, Raffaele F, Torma C, Bacer S, Coppola E, Giorgi F, Ahrens B, Dubois C, Sanchez E, Verdecchia M (2018) Assessment of multiple daily precipitation statistics in ERA-Interim driven Med-CORDEX and EURO-CORDEX experiments against high resolution observations. *Climate dynamics* 51(3) :877–900, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3453-4>
- Feng Z, Leung LR, Hardin J, Terai CR, Song F, Caldwell P (2023) Mesoscale Convective Systems in DYAMOND Global Convection-Permitting Simulations. *Geophysical Research Letters* 50(4) :e2022GL102,603, URL <https://doi.org/10.1029/2022GL102603>
- Fiolleau T, Roca R (2013) An algorithm for the detection and tracking of tropical mesoscale convective systems using infrared images from geostationary satellite. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing* 51(7) :4302–4315, URL <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2227762>
- Fitzpatrick RG, Parker DJ, Marsham JH, Rowell DP, Guichard FM, Taylor CM, Cook KH, Vizzy EK, Jackson LS, Finney D, et al (2020) What drives the intensification of mesoscale convective systems over the West African Sahel under climate change? *Journal of Climate* 33(8) :3151–3172, URL <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0380.1>
- Flaounas E, Gray SL, Teubler F (2021) A process-based anatomy of Mediterranean cyclones : from baroclinic lows to tropical-like systems. *Weather and Climate Dynamics* 2(1) :255–279, URL <https://doi.org/10.5194/wcd-2-255-2021>
- Flaounas E, Davolio S, Raveh-Rubin S, Pantillon F, Miglietta MM, Gaertner MA, Hatzaki M, Homar V, Khodayar S, Korres G, et al (2022) Mediterranean cyclones : Current knowledge and open questions on dynamics, prediction, climatology and impacts. *Weather and Climate Dynamics* 3(1) :173–208, URL <https://doi.org/10.5194/wcd-3-173-2022>
- Fosser G, Khodayar S, Berg P (2015) Benefit of convection permitting climate model simulations in the representation of convective precipitation. *Climate Dynamics* 44(1-2) :45–60, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2242-1>
- Fouquart Y, Bonnel B (1980) Computations of solar heating of the earth's atmosphere- A new parameterization. *Beitraege zur Physik der Atmosphaere* 53 :35–62
- Fumière Q, Déqué M, Nuissier O, Somot S, Alias A, Caillaud C, Laurantin O, Seity Y (2020) Extreme rainfall in Mediterranean France during the fall : added value of the CNRM-AROME Convection-Permitting Regional Climate Model. *Climate Dynamics* 55 :77–91, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04898-8>

- Fumière Q (2019) Changement climatique et précipitations extrêmes : apport des modèles résolvant la convection. PhD thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse III. <http://thesesups.ups-tlse.fr/4564/>
- Gervais M, Tremblay LB, Gyakum JR, Atallah E (2014) Representing extremes in a daily gridded precipitation analysis over the United States : Impacts of station density, resolution, and gridding methods. *Journal of Climate* 27(14) :5201–5218, URL <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00319.1>
- Giorgi F (2006) Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters* 33(8), URL <https://doi.org/10.1029/2006GL025734>
- Giorgi F (2019) Thirty years of regional climate modeling : Where are we and where are we going next? *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 124(11) :5696–5723, URL <https://doi.org/10.1029/2018JD030094>
- Giorgi F, Bates GT (1989) The climatological skill of a regional model over complex terrain. *Monthly Weather Review* 117(11) :2325–2347, URL [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<2325:TCSOAR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<2325:TCSOAR>2.0.CO;2)
- Giorgi F, Mearns LO (1999) Introduction to special section : Regional climate modeling revisited. URL <https://doi.org/10.1029/98JD02072>
- Giorgi F, Coppola E, Solmon F, Mariotti L, Sylla M, Bi X, Elguindi N, Diro G, Nair V, Giuliani G, et al (2012) RegCM4 : model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research* 52 :7–29, URL <https://doi.org/10.3354/cr01018>
- Giorgi F, Torma C, Coppola E, Ban N, Schär C, Somot S (2016) Enhanced summer convective rainfall at Alpine high elevations in response to climate warming. *Nature Geoscience* 9(8) :584–589, URL <https://doi.org/10.1038/ngeo2761>
- Giorgi F, Coppola E, Giuliani G, Ciarlo JM, Pichelli E, Nogherotto R, Raffaele F, Malguzzi P, Davolio S, Stocchi P, et al (2023) The fifth generation Regional Climate Modeling System, regCM5 : Description and illustrative examples at Parameterized Convection and Convection-Permitting Resolutions. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 128(6) :e2022JD038199, URL <https://doi.org/10.1029/2022JD038199>
- Goulet L (2015) La prévision des systèmes orageux stationnaires dans le sud-est de la France. *La Météorologie* 2015(90) :27–39, URL <https://doi.org/10.4267/2042/56836>
- Guérémy J (2011) A continuous buoyancy based convection scheme : one-and three-dimensional validation. *Tellus A : Dynamic Meteorology and Oceanography* 63(4) :687–706, URL <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2011.00521.x>
- Gustafsson N, Janjić T, Schraff C, Leuenberger D, Weissmann M, Reich H, Brousseau P, Montmerle T, Wattrelot E, Bučánek A, et al (2018) Survey of data assimilation methods for convective-scale numerical weather prediction at operational

- centres. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 144(713) :1218–1256, URL <https://doi.org/10.1002/qj.3179>
- Ha MT, Bastin S, Drobinski P, Fita L, Polcher J, Bock O, Chiriaco M, Belušić D, Caillaud C, Dobler A, et al (2022) Precipitation frequency in Med-CORDEX and EURO-CORDEX ensembles from 0.44° to convection-permitting resolution : impact of model resolution and convection representation. *Climate Dynamics* pp 1–26, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06594-6>
- Haberlie AM, Ashley WS (2019) Climatological representation of mesoscale convective systems in a dynamically downscaled climate simulation. *International Journal of Climatology* 39(2) :1144–1153, URL <https://doi.org/10.1002/joc.5880>
- Harvey B, Cook P, Shaffrey L, Schiemann R (2020) The response of the northern hemisphere storm tracks and jet streams to climate change in the CMIP3, CMIP5, and CMIP6 climate models. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 125(23) :e2020JD032,701, URL <https://doi.org/10.1029/2020JD032701>
- Hausfather Z, Peters GP (2020) Emissions—the ‘business as usual’ story is misleading. *Nature* 577(7792) :618–620, URL <https://doi.org/10.1038/d41586-020-00177-3>
- Hawkins E, Sutton R (2011) The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Climate dynamics* 37 :407–418, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0810-6>
- Hazeleger W, Wang X, Severijns C, Ștefănescu S, Bintanja R, Sterl A, Wyser K, Semmler T, Yang S, Van den Hurk B, et al (2012) EC-Earth V2. 2 : description and validation of a new seamless earth system prediction model. *Climate dynamics* 39 :2611–2629, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1228-5>
- Hernandez E, Cana L, Diaz J, Garcia R, Gimeno L (1998) Mesoscale convective complexes over the western Mediterranean area during 1990–1994. *Meteorology and Atmospheric Physics* 68(1-2) :1–12, DOI 10.1007/BF01025379
- Herrmann M, Somot S, Calmanti S, Dubois C, Sevault F (2011) Representation of spatial and temporal variability of daily wind speed and of intense wind events over the Mediterranean Sea using dynamical downscaling : impact of the regional climate model configuration. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11 :1983–2001, DOI 10.5194/nhess-11-1983-2011
- Hirt M, Craig GC, Schäfer SA, Savre J, Heinze R (2020) Cold-pool-driven convective initiation : Using causal graph analysis to determine what convection-permitting models are missing. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146(730) :2205–2227, URL <https://doi.org/10.1002/qj.3788>
- Hohenegger C, Brockhaus P, Schaer C (2008) Towards climate simulations at cloud-resolving scales. *Meteorologische Zeitschrift* 17(4) :383–394, DOI 10.1127/0941-2948/2008/0303

- Hong SY, Kanamitsu M (2014) Dynamical downscaling : Fundamental issues from an NWP point of view and recommendations. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 50(1) :83–104, DOI 10.1007/s13143-014-0029-2
- Hou AY, Azarbarzin AA, Kakar RK, Neeck S (2011) The Global Precipitation Measurement (GPM) Mission : Overview and US Status
- Houze Jr RA (2014) *Cloud dynamics*. Academic press
- Huffman GJ, Adler RF, Bolvin DT, Nelkin EJ (2010) The TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA). In : *Satellite rainfall applications for surface hydrology*, Springer, pp 3–22
- Iacono MJ, Delamere JS, Mlawer EJ, Shephard MW, Clough SA, Collins WD (2008) Radiative forcing by long-lived greenhouse gases : Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 113(D13), DOI 10.1029/2008JD009944
- Isotta FA, Frei C, Weilguni V, Perčec Tadić M, Lassegues P, Rudolf B, Pavan V, Cacciamani C, Antolini G, Ratto SM, et al (2014) The climate of daily precipitation in the Alps : development and analysis of a high-resolution grid dataset from pan-Alpine rain-gauge data. *International Journal of Climatology* 34(5) :1657–1675, DOI 10.1002/joc.3794
- Jacob D, Elizalde A, Haensler A, Hagemann S, Kumar P, Podzun R, Rechid D, Remedio AR, Saeed F, Sieck K, et al (2012) Assessing the transferability of the regional climate model REMO to different coordinated regional climate downscaling experiment (CORDEX) regions. *Atmosphere* 3(1) :181–199, URL <https://doi.org/10.3390/atmos3010181>
- Jacob D, Petersen J, Eggert B, Alias A, Christensen OB, Bouwer LM, Braun A, Colette A, Déqué M, Georgievski G, et al (2014) EURO-CORDEX : new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change* 14(2) :563–578, DOI 10.1007/s10113-014-0587-y
- Jain S, Scaife AA, Shepherd TG, Deser C, Dunstone N, Schmidt GA, Trenberth KE, Turkington T (2023) Importance of internal variability for climate model assessment. *npj Climate and Atmospheric Science* 6(1) :68, URL <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00389-0>
- John A, Douville H, Ribes A, Yiou P (2022) Quantifying CMIP6 model uncertainties in extreme precipitation projections. *Weather and Climate Extremes* 36 :100,435, URL <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100435>
- Johnson RH, Ciesielski PE (2020) Potential Vorticity Generation by West African Squall Lines. *Monthly Weather Review* 148(4) :1691–1715, URL <https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0342.1>

- Joly B, Girardot N, Roulet B, Labadie C (2012) Experimental Daily Forecasts of Northern Atlantic Weather Regimes and Heavy Precipitating Events (HPEs) over Southern France with the Meteo France Global Ensemble System PEARP
- Jones C, Hughes J, Bellouin N, Hardiman S, Jones G, Knight J, Liddicoat S, O’connor F, Andres RJ, Bell C, et al (2011) The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geoscientific Model Development* 4(3) :543–570, URL <https://doi.org/10.5194/gmd-4-543-2011>
- Joyce RJ, Janowiak JE, Arkin PA, Xie P (2004) CMORPH : A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology* 5(3) :487–503, DOI 10.1175/1525-7541(2004)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2
- Kahraman A, Kendon EJ, Chan SC, Fowler HJ (2021) Quasi-stationary intense rainstorms spread across Europe under Climate Change. *Geophysical Research Letters* 48(13) :e2020GL092361, URL <https://doi.org/10.1029/2020GL092361>
- Kendon E, Fosser G, Murphy J, Chan S, Clark R, Harris G, Lock A, Lowe J, Martin G, Pirret J, et al (2019) UKCP Convection-permitting model projections : Science report
- Kendon EJ, Roberts NM, Fowler HJ, Roberts MJ, Chan SC, Senior CA (2014) Heavier summer downpours with climate change revealed by weather forecast resolution model. *Nature Climate Change* 4(7) :570–576, DOI 10.1038/nclimate2258
- Kendon EJ, Ban N, Roberts NM, Fowler HJ, Roberts MJ, Chan SC, Evans JP, Fosser G, Wilkinson JM (2017) Do convection-permitting regional climate models improve projections of future precipitation change? *Bulletin of the American Meteorological Society* 98(1) :79–93, DOI <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-0004.1>
- Kendon EJ, Fischer EM, Short CJ (2023) Variability conceals emerging trend in 100yr projections of UK local hourly rainfall extremes. *Nature Communications* 14(1) :1133, URL <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36499-9>
- Kerr RA (2013) Forecasting regional climate change flunks its first test. DOI 10.1126/science.339.6120.63
- Keuler K, Radtke K, Kotlarski S, Lüthi D (2016) Regional climate change over Europe in COSMO–CLM : Influence of emission scenario and driving global model. *Meteorologische Zeitschrift* 25(2) :121–136, URL <https://doi.org/10.1127/metz/2016/0662>
- Khodayar S, Davolio S, Di Girolamo P, Lebeaupin Brossier C, Flaounas E, Fourrie N, Lee KO, Ricard D, Vie B, Bouttier F, et al (2021) Overview towards improved understanding of the mechanisms leading to heavy precipitation in the western Mediterranean : lessons learned from HyMeX. *Atmospheric Chemistry and Physics* 21(22) :17,051–17,078, URL <https://doi.org/10.5194/acp-21-17051-2021>

- Knist S, Goergen K, Simmer C (2020) Evaluation and projected changes of precipitation statistics in convection-permitting WRF climate simulations over Central Europe. *Climate Dynamics* 55 :325–341, DOI 10.1007/s00382-018-4147-x
- Kreitz M (2021) Trois phénomènes météorologiques exceptionnels durant l’automne 2020. *La Météorologie* p 115, DOI 10.37053/lameteorologie-2021-0031
- Krichak SO, Barkan J, Breitgand JS, Gualdi S, Feldstein SB (2015) The role of the export of tropical moisture into midlatitudes for extreme precipitation events in the Mediterranean region. *Theoretical and Applied Climatology* 121(3-4) :499–515, URL <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1244-6>
- Lac C, Chaboureaud JP, Masson V, Pinty JP, Tulet P, Escobar J, Leriche M, Barthe C, Aouizerats B, Augros C, et al (2018) Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications. *Geoscientific Model Development* 11(5) :1929–1969, DOI 10.5194/gmd-11-1929-2018
- Lafore JP, Stein J, Asencio N, Bougeault P, Ducrocq V, Duron J, Fischer C, Hérelil P, Mascart P, Masson V, Pinty JP, Redelsperger JL, Richard E, Vilà-Guerau de Arellano J (1998) The Meso-NH atmospheric simulation system. part I : adiabatic formulation and control simulations. *Annales Geophysicae* 16(1) :90–109, DOI 10.1007/s00585-997-0090-6
- Laprise R, De Elia R, Caya D, Biner S, Lucas-Picher P, Diaconescu E, Leduc M, Alexandru A, Separovic L, et al (2008) Challenging some tenets of regional climate modelling. *Meteorology and Atmospheric Physics* 100(1-4) :3–22, DOI 10.1007/s00703-008-0292-9
- Lascaux F, Richard E, Pinty JP (2006) Numerical simulations of three different MAP IOPs and the associated microphysical processes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society : A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography* 132(619) :1907–1926, DOI 10.1256/qj.05.197
- Lassegues P (2018) Daily and climatological fields of precipitation over the western Alps with a high density network for the period of 1990–2012. *Theoretical and applied climatology* 131(1-2) :1–17, DOI 10.1007/s00704-016-1954-z
- Laurantin O (2008) ANTILOPE : Hourly rainfall analysis merging radar and rain gauge data. In : *Proceedings of the International Symposium on Weather Radar and Hydrology*, pp 2–8
- Le Moigne P, Besson F, Martin E, Boé J, Boone A, Decharme B, Etchevers P, Faroux S, Habets F, Lafaysse M, et al (2020) The latest improvements with SURFEX v8. 0 of the Safran–Isba–Modcou hydrometeorological model for France. *Geoscientific Model Development* 13(9) :3925–3946, URL <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3925-2020>
- Lebeaupin C, Ducrocq V, Giordani H (2006) Sensitivity of torrential rain events to the sea surface temperature based on high-resolution numerical forecasts. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 111(D12), URL <https://doi.org/10.1029/2005JD006541>

- Lebeaupin Brossier C, Ducrocq V, Giordani H (2008) Sensitivity of three Mediterranean heavy rain events to two different sea surface fluxes parameterizations in high-resolution numerical modeling. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 113(D21), URL <https://doi.org/10.1029/2007JD009613>
- Lehner F, Deser C, Maher N, Marotzke J, Fischer EM, Brunner L, Knutti R, Hawkins E (2020) Partitioning climate projection uncertainty with multiple large ensembles and CMIP5/6. *Earth System Dynamics* 11(2) :491–508, URL <https://doi.org/10.5194/esd-11-491-2020>
- Lemonsu A, Caillaud C, Alias A, Riette S, Seity Y, Le Roy B, Michau Y, Lucas-Picher P (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). *Climate Dynamics* pp 1–19, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06647-w>
- Lenderink G, Belušić D, Fowler HJ, Kjellström E, Lind P, van Meijgaard E, van Ulft B, de Vries H (2019) Systematic increases in the thermodynamic response of hourly precipitation extremes in an idealized warming experiment with a convection-permitting climate model. *Environmental Research Letters* 14(7) :074,012, DOI 10.1088/1748-9326/ab214a
- Leutwyler D, Lüthi D, Ban N, Fuhrer O, Schär C (2017) Evaluation of the convection-resolving climate modeling approach on continental scales. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 122(10) :5237–5258, DOI 10.1002/2016JD026013
- Li D, Shine K (1999) Uk universities global atmospheric modelling programme (ugamp) global ozone climatology project dataset, ncas british atmospheric data centre
- Li L, Li Y, Li Z (2020) Object-based tracking of precipitation systems in western Canada : the importance of temporal resolution of source data. *Climate Dynamics* pp 1–17, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05388-y>
- Lind P, Lindstedt D, Kjellström E, Jones C (2016) Spatial and temporal characteristics of summer precipitation over central Europe in a suite of high-resolution climate models. *Journal of Climate* 29(10) :3501–3518, DOI 10.1007/s00382-018-4114-6
- Lind P, Belušić D, Christensen OB, Dobler A, Kjellström E, Landgren O, Lindstedt D, Matte D, Pedersen RA, Toivonen E, et al (2020) Benefits and added value of convection-permitting climate modeling over Fenno–Scandinavia. *Climate Dynamics* 55(7) :1893–1912, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05359-3>
- Lochbihler K, Lenderink G, Siebesma AP (2017) The spatial extent of rainfall events and its relation to precipitation scaling. *Geophysical Research Letters* 44(16) :8629–8636, URL <https://doi.org/10.1002/2017GL074857>

- Lopez P (2002) Implementation and validation of a new prognostic large-scale cloud and precipitation scheme for climate and data-assimilation purposes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 128(579) :229–257, URL <https://doi.org/10.1256/00359000260498879>
- Lucas-Picher P, Argüeso D, Brisson E, Trambly Y, Berg P, Lemonsu A, Kotlarski S, Caillaud C (2021) Convection-permitting modeling with regional climate models : Latest developments and next steps. *Wiley Interdisciplinary Reviews : Climate Change* 12(6) :e731, URL <https://doi.org/10.1002/wcc.731>
- Lucas-Picher P, Brisson E, Caillaud C, Alias A, Nabat P, Lemonsu A, Poncet N, Cortés Hernandez V, Michau Y, Doury A, et al (2023) Evaluation of the convection-permitting regional climate model CNRM-AROME41t1 over northwestern Europe. *Climate Dynamics* pp 1–29, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06637-y>
- Lüthi S, Ban N, Kotlarski S, Steger CR, Jonas T, Schär C (2019) Projections of alpine snow-cover in a high-resolution climate simulation. *Atmosphere* 10(8) :463, URL <https://doi.org/10.3390/atmos10080463>
- Luu NL (2020) The role of human-induced climate change on extreme convective precipitation events in the south of France : a high-resolution model simulation approach. PhD thesis, Université Paris-Saclay
- Malardel S, Ricard D (2015) An alternative cell-averaged departure point reconstruction for pointwise semi-Lagrangian transport schemes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 141(691) :2114–2126, DOI 10.1002/qj.2509
- Maraun D, Wetterhall F, Ireson A, Chandler R, Kendon E, Widmann M, Brienen S, Rust H, Sauter T, Themeßl M, et al (2010) Precipitation downscaling under climate change : Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of geophysics* 48(3), URL <https://doi.org/10.1029/2009RG000314>
- Marsland SJ, Haak H, Jungclaus JH, Latif M, Röske F (2003) The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates. *Ocean modelling* 5(2) :91–127, URL [https://doi.org/10.1016/S1463-5003\(02\)00015-X](https://doi.org/10.1016/S1463-5003(02)00015-X)
- Masson V (2000) A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-layer meteorology* 94(3) :357–397, DOI 10.1023/A:1002463829265
- Masson V, Seity Y (2009) Including atmospheric layers in vegetation and urban offline surface schemes. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48(7) :1377–1397, DOI 10.1175/2009JAMC1866.1
- Masson V, Champeaux JL, Chauvin F, Meriguet C, Lacaze R (2003) A global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models. *Journal of climate* 16(9) :1261–1282, DOI 10.1175/1520-0442-16.9.1261

- Masson V, Le Moigne P, Martin E, Faroux S, Alias A, Alkama R, Belamari S, Barbu A, Boone A, Bouyssel F, et al (2013) The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geoscientific Model Development* 6 :929–960, URL <https://doi.org/10.5194/gmd-6-929-2013>
- Matte D, Laprise R, Thériault JM (2016) Comparison between high-resolution climate simulations using single-and double-nesting approaches within the Big-Brother experimental protocol. *Climate Dynamics* 47(12) :3613–3626, DOI 10.1007/s00382-016-3031-9
- Matte D, Laprise R, Thériault JM, Lucas-Picher P (2017) Spatial spin-up of fine scales in a regional climate model simulation driven by low-resolution boundary conditions. *Climate Dynamics* 49(1-2) :563–574, DOI 10.1007/s00382-016-3358-2
- Matte D, Christensen JH, Feddersen H, Vedel H, Nielsen NW, Pedersen RA, Zeitzen RM (2022) On the Potentials and Limitations of Attributing a Small-Scale Climate Event. *Geophysical Research Letters* 49(16) :e2022GL099481, URL <https://doi.org/10.1029/2022GL099481>
- van Meijgaard E, Van Ulft L, Van de Berg W, Bosveld F, Van den Hurk B, Lenderink G, Siebesma A (2008) The KNMI regional atmospheric climate model RACMO, version 2.1. KNMI De Bilt, The Netherlands
- van Meijgaard E, Van Ulft L, Lenderink G, De Roode S, Wipfler EL, Boers R, van Timmermans R (2012) Refinement and application of a regional atmospheric model for climate scenario calculations of Western Europe. KVR 054/12, KvR
- Meinshausen M, Smith SJ, Calvin K, Daniel JS, Kainuma ML, Lamarque JF, Matsumoto K, Montzka SA, Raper SC, Riahi K, et al (2011) The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic change* 109 :213–241, URL <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>
- Meredith EP, Rust HW, Ulbrich U (2018) A classification algorithm for selective dynamical downscaling of precipitation extremes. *Hydrology and Earth System Sciences* 22(8) :4183–4200, DOI 10.17169/refubium-598
- Meurdesoif Y (2018) Xios fortran reference guide. IPSL : Singapore
- Michau Y, Lemonsu A, Lucas-Picher P, Caillaud C (2023a) Evaluation of the Urban Heat Island of 12 cities of France in a high-resolution regional climate model simulation. *Urban Climate* 47 :101,386, URL <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101386>
- Michau Y, Lemonsu A, Lucas-Picher P, Schneider M, Caillaud C (2023b) On the future evolution of heatwaves in French cities and associated rural areas : insights from a Convection-Permitting Model. *Urban Climate* p Submitted
- Mironov D, Heise E, Kourzeneva E, Ritter B, Schneider N, Terzhevik A (2010) Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO

- Mizielinski M, Roberts M, Vidale P, Schiemann R, Demory ME, Strachan J, Edwards T, Stephens A, Lawrence B, Pritchard M, et al (2014) High-resolution global climate modelling : the UPSCALE project, a large-simulation campaign. *Geoscientific Model Development* 7(4) :1629–1640, URL <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1629-2014>
- Mlawer EJ, Taubman SJ, Brown PD, Iacono MJ, Clough SA (1997) Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres : RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 102(D14) :16,663–16,682, DOI 10.1029/97JD00237
- Molina M, Careto JA, Soares PM, Gutierrez C, Sanchez E, Goergen K, Sobolowski S, Coppola E, Ban N, Belusic D, Berthou S, Caillaud C, et al (2023) The added value of the km-scale multimodel ensemble of the FPS-Convection to describe wind speed over the Alps. *Climate Dynamics* p Submitted
- Monteiro D, Caillaud C, Samacoïts R, Lafaysse M, Morin S (2022) Potential and limitations of convection-permitting CNRM-AROME climate modelling in the French Alps. *International Journal of Climatology* 42(14) :7162–7185, URL <https://doi.org/10.1002/joc.7637>
- Morcrette JJ (2001) The surface downward longwave radiation in the ECMWF forecast system. *Journal of climate* 15(14) :1875–1892, DOI 10.1175/1520-0442(2002)015<1875:TSDLRI>2.0.CO;2
- Morel C, Senesi S (2002a) A climatology of mesoscale convective systems over Europe using satellite infrared imagery. I : Methodology. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society : A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography* 128(584) :1953–1971, DOI 10.1256/003590002320603485
- Morel C, Senesi S (2002b) A climatology of mesoscale convective systems over Europe using satellite infrared imagery. II : Characteristics of European mesoscale convective systems. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society : A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography* 128(584) :1973–1995, DOI 10.1256/003590002320603494
- Mounier A, Raynaud L, Rottner L, Plu M, Arbogast P, Kreitz M, Mignan L, Touzé B (2022) Detection of bow echoes in kilometer-scale forecasts using a convolutional neural network. *Artificial Intelligence for the Earth Systems* 1(2) :e210,010, URL <https://doi.org/10.1175/AIES-D-21-0010.1>
- Müller SK, Caillaud C, Chan S, de Vries H, Bastin S, Berthou S, Brisson E, Demory ME, Feldmann H, Goergen K, et al (2022) Evaluation of Alpine-Mediterranean precipitation events in convection-permitting regional climate models using a set of tracking algorithms. *Climate Dynamics* pp 1–19, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06555-z>

- Müller SK, Pichelli E, Coppola E, Berthou S, Brienen S, Caillaud C, Demory MED, Dobler A, Feldmann H, Mercogliano P, Merja T, de Vries H (2023) The Climate Change Response of Heavy Precipitation Events over the Alps and in the Mediterranean. *Climate Dynamics* DOI 10.1007/s00382-023-06901-9
- Nabat P, Somot S, Mallet M, Chiapello I, Morcrette J, Solmon F, Szopa S, Dulac F, Collins W, Ghan S, et al (2013) A 4-D climatology (1979–2009) of the monthly tropospheric aerosol optical depth distribution over the Mediterranean region from a comparative evaluation and blending of remote sensing and model products. *Atmospheric Measurement Techniques* 6(5) :1287–1314, DOI 10.5194/amt-6-1287-2013
- Nabat P, Somot S, Cassou C, Mallet M, Michou M, Bouniol D, Decharme B, Drugé T, Roehrig R, Saint-Martin D (2020) Modulation of radiative aerosols effects by atmospheric circulation over the Euro-Mediterranean region. *Atmospheric Chemistry and Physics* 20(14) :8315–8349, URL <https://doi.org/10.5194/acp-20-8315-2020>
- Neff EL (1977) How much rain does a rain gage gage ? *Journal of Hydrology* 35(3-4) :213–220, DOI 10.1016/0022-1694(77)90001-4
- Noilhan J, Planton S (1989) A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly weather review* 117(3) :536–549, DOI 10.1175/1520-0493(1989)117<0536:ASPOLS>2.0.CO;2
- Nuissier O, Ducrocq V, Ricard D, Lebeaupin C, Anquetin S (2008) A numerical study of three catastrophic precipitating events over southern France. I : Numerical framework and synoptic ingredients. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 134(630) :111–130, DOI 10.1002/qj.200
- Nuissier O, Joly B, Joly A, Ducrocq V, Arbogast P (2011) A statistical downscaling to identify the large-scale circulation patterns associated with heavy precipitation events over southern France. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137(660) :1812–1827, DOI 10.1002/qj.866
- Oudar T, Cattiaux J, Douville H (2020) Drivers of the northern extratropical eddy-driven jet change in CMIP5 and CMIP6 models. *Geophysical Research Letters* 47(8) :e2019GL086695, URL <https://doi.org/10.1029/2019GL086695>
- Palmer T (2014) Climate forecasting : Build high-resolution global climate models. *Nature* 515(7527) :338–339, URL <https://doi.org/10.1038/515338a>
- Parker WS (2016) Reanalyses and observations : What’s the difference? *Bulletin of the American Meteorological Society* 97(9) :1565–1572, URL <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00226.1>
- Pergaud J, Masson V, Malardel S, Couvreur F (2009) A parameterization of dry thermals and shallow cumuli for mesoscale numerical weather prediction. *Boundary-layer meteorology* 132(1) :83–106, URL <https://doi.org/10.1007/s10546-009-9388-0>

- Pfahl S, O’Gorman PA, Fischer EM (2017) Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. *Nature Climate Change* 7(6) :423, URL <https://doi.org/10.1038/nclimate3287>
- Pichelli E, Coppola E, Sobolowski S, Ban N, Giorgi F, Stocchi P, Alias A, Belusic D, Berthou S, Caillaud C, M Cardoso R, Chan S, et al (2021) The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution part 2 : future precipitation projections. *Climate Dynamics* URL <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05657-4>
- Pinty JP, Jabouille P (1998) A mixed-phased cloud parameterization for use in a mesoscale non-hydrostatic model : simulations of a squall line and of orographic precipitation. In : *Conference on Cloud Physics : 14th Conference on Planned and Inadvertent Weather Modification*, pp 17–21
- Piriou JM, Redelsperger JL, Geleyn JF, Lafore JP, Guichard F (2007) An approach for convective parameterization with memory : Separating microphysics and transport in grid-scale equations. *Journal of the Atmospheric Sciences* 64(11) :4127–4139, URL <https://doi.org/10.1175/2007JAS2144.1>
- Poncet N, Lucas-Picher P, Trambly Y, Thirel G, Vergara H, Gourley J, Alias A (2023) Does a convection-permitting regional climate model bring new perspectives on the projection of mediterranean floods ? *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions* 2023 :In review
- Powers JG, Klemp JB, Skamarock WC, Davis CA, Dudhia J, Gill DO, Coen JL, Gochis DJ, Ahmadov R, Peckham SE, et al (2017) The weather research and forecasting model : Overview, system efforts, and future directions. *Bulletin of the American Meteorological Society* 98(8) :1717–1737, URL <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00308.1>
- Prein A, Gobiet A, Suklitsch M, Truhetz H, Awan N, Keuler K, Georgievski G (2013) Added value of convection permitting seasonal simulations. *Climate Dynamics* 41(9-10) :2655–2677, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1744-6>
- Prein A, Gobiet A, Truhetz H, Keuler K, Goergen K, Teichmann C, Maule CF, Van Meijgaard E, Déqué M, Nikulin G, et al (2016) Precipitation in the EURO-CORDEX 0.11° and 0.44° simulations : high resolution, high benefits ? *Climate Dynamics* 46(1-2) :383–412, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2589-y>
- Prein AF, Langhans W, Fossier G, Ferrone A, Ban N, Goergen K, Keller M, Tölle M, Gutjahr O, Feser F, et al (2015) A review on regional convection-permitting climate modeling : Demonstrations, prospects, and challenges. *Reviews of geophysics* 53(2) :323–361, URL <https://doi.org/10.1002/2014RG000475>
- Prein AF, Liu C, Ikeda K, Trier SB, Rasmussen RM, Holland GJ, Clark MP (2017) Increased rainfall volume from future convective storms in the US. *Nature Climate Change* 7(12) :880–884, URL <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0007-7>

- Prein AF, Liu C, Ikeda K, Bullock R, Rasmussen RM, Holland GJ, Clark M (2020) Simulating North American mesoscale convective systems with a convection-permitting climate model. *Climate Dynamics* 55 :95–110, DOI 10.1007/s00382-017-3993-2
- Purr C, Brisson E, Ahrens B (2019) Convective shower characteristics simulated with the convection-permitting climate model COSMO–CLM. *Atmosphere* 10(12) :810, URL <https://doi.org/10.3390/atmos10120810>
- Purr C, Brisson E, Ahrens B (2021) Convective rain cell characteristics and scaling in climate projections for Germany. *International Journal of Climatology* 41(5) :3174–3185, URL <https://doi.org/10.1002/joc.7012>
- Purr C, Brisson E, Schlünzen KH, Ahrens B (2022) Convective rain cell properties and the resulting precipitation scaling in a warm-temperate climate. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 148(745) :1768–1781, URL <https://doi.org/10.1002/qj.4277>
- Quintana-Segui P, Le Moigne P, Durand Y, Martin E, Habets F, Baillon M, Canellas C, Franchisteguy L, Morel S (2008) Analysis of near-surface atmospheric variables : Validation of the SAFRAN analysis over France. *Journal of applied meteorology and climatology* 47(1) :92–107, URL <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1636.1>
- Raddatz T, Reick C, Knorr W, Kattge J, Roeckner E, Schnur R, Schnitzler KG, Wetzel P, Jungclaus J (2007) Will the tropical land biosphere dominate the climate–carbon cycle feedback during the twenty-first century? *Climate dynamics* 29 :565–574, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0247-8>
- Radu R, Déqué M, Somot S (2008) Spectral nudging in a spectral regional climate model. *Tellus A : Dynamic Meteorology and Oceanography* 60(5) :898–910, URL <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2008.00341.x>
- Rainaud R, Brossier CL, Ducrocq V, Giordani H (2017) High-resolution air–sea coupling impact on two heavy precipitation events in the Western Mediterranean. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 143(707) :2448–2462, URL <https://doi.org/10.1002/qj.3098>
- Rajczak J, Schär C (2017) Projections of future precipitation extremes over Europe : A multimodel assessment of climate simulations. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 122(20) :10–773, URL <https://doi.org/10.1002/2017JD027176>
- Rasmussen R, Liu C, Ikeda K, Gochis D, Yates D, Chen F, Tewari M, Barlage M, Dudhia J, Yu W, et al (2011) High-resolution coupled climate runoff simulations of seasonal snowfall over colorado : a process study of current and warmer climate. *Journal of Climate* 24(12) :3015–3048, URL <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3985.1>
- Reder A, Raffa M, Montesarchio M, Mercogliano P, et al (2020) Performance evaluation of regional climate model simulations at different spatial and temporal scales over the

- complex orography area of the Alpine region. *Natural Hazards : Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards* pp 1–27, URL <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03916-x>
- Ribes A, Thao S, Vautard R, Dubuisson B, Somot S, Colin J, Planton S, Soubeyroux JM (2019) Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean. *Climate Dynamics* pp 1–20, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4179-2>
- Ribes A, Boé J, Qasmi S, Dubuisson B, Douville H, Terray L (2022) An updated assessment of past and future warming over France based on a regional observational constraint. *Earth System Dynamics* 13(4) :1397–1415, URL <https://doi.org/10.5194/esd-13-1397-2022>
- Ricard D, Beaulant A, Boé J, Déqué M, Joly B, Martin E, Nuissier O, Seguí PQ, Ribes A, Sevault F, et al (2009) Impact du changement climatique sur les événements de pluie intense du bassin méditerranéen :(projet cyprim, partie ii). *Météorologie* (67) :19–30
- Ricard D, Ducrocq V, Auger L (2012) A climatology of the mesoscale environment associated with heavily precipitating events over a northwestern Mediterranean area. *Journal of applied meteorology and climatology* 51(3) :468–488, URL <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-017.1>
- Ricard D, Lac C, Riette S, Legrand R, Mary A (2013) Kinetic energy spectra characteristics of two convection-permitting limited-area models AROME and Meso-NH. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 139(674) :1327–1341, URL <https://doi.org/10.1002/qj.2025>
- Richard E, Buzzi A, Zängl G (2007) Quantitative precipitation forecasting in the Alps : The advances achieved by the Mesoscale Alpine Programme. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 133(625) :831–846, URL <https://doi.org/10.1002/qj.65>
- Rockel B, Will A, Hense A (2008) The regional climate model COSMO–CLM (CCLM). *Meteorologische Zeitschrift* 17(4) :347
- Roger L (2018) Validation et utilisation climatologiques de la ré-analyse de lame d’eau radar Comephore étendue. Master’s thesis, Ecole Nationale de la Météorologie, Météo-France
- Ruti PM, Somot S, Giorgi F, Dubois C, Flaounas E, Obermann A, Dell’Aquila A, Pisacane G, Harzallah A, Lombardi E, et al (2016) MED-CORDEX initiative for Mediterranean climate studies. *Bulletin of the American Meteorological Society* 97(7) :1187–1208, URL <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00176.1>
- Saltikoff E, Haase G, Delobbe L, Gaussiat N, Martet M, Idziorek D, Leijnse H, Novák P, Lukach M, Stephan K (2019) OPERA the radar project. *Atmosphere* 10(6) :320, URL <https://doi.org/10.3390/atmos10060320>

- Sanchez-Gomez E, Somot S (2016) Impact of the internal variability on the cyclone tracks simulated by a regional climate model over the Med-CORDEX domain. *Climate Dynamics* pp 1–17, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3394-y>
- Sanchez-Gomez E, Somot S, Déqué M (2009) Ability of an ensemble of regional climate models to reproduce weather regimes over Europe-Atlantic during the period 1961–2000. *Climate Dynamics* 33(5) :723–736, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0502-7>
- Schär C, Frei C, Lüthi D, Davies HC (1996) Surrogate climate-change scenarios for regional climate models. *Geophysical Research Letters* 23(6) :669–672, URL <https://doi.org/10.1029/96GL00265>
- Schroeder K, Kirchengast G, O S (2018) Strong Dependence of Extreme Convective Precipitation Intensities on Gauge Network Density. *Geophysical Research Letters* 45(16) :8253–8263, URL <https://doi.org/10.1029/2018GL077994>
- Seity Y, Brousseau P, Malardel S, Hello G, Bénard P, Bouttier F, Lac C, Masson V (2011) The AROME-France convective-scale operational model. *Monthly Weather Review* 139(3) :976–991, URL <https://doi.org/10.1175/2010MWR3425.1>
- Seneviratne SI, Zhang X, Adnan M, Badi W, Dereczynski C, Di Luca A, Vicente-Serrano SM, Wehner M, Zhou B (2021) Chapter 11 : Weather and climate extreme events in a changing climate. in : *Ipcc 2021 : Climate change 2021 : The physical science basis. contribution of working group i to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. DOI 10.1017/9781009157896.013
- Sevault F, Somot S, Alias A, Dubois C, Lebeaupin-Brossier C, Nabat P, Adloff F, Déqué M, Decharme B (2014) A fully coupled Mediterranean regional climate system model : design and evaluation of the ocean component for the 1980–2012 period. *Tellus A : Dynamic Meteorology and Oceanography* 66(1) :23,967, URL <https://doi.org/10.3402/tellusa.v66.23967>
- Shepherd TG (2019) Storyline approach to the construction of regional climate change information. *Proceedings of the Royal Society A* 475(2225) :20190,013, URL <https://doi.org/10.1098/rspa.2019.0013>
- Skamarock W (2008) A description of the advanced research WRF version 3. Tech Note pp 1–96, DOI 10.5065/D68S4MVH
- Skamarock WC (2004) Evaluating mesoscale NWP models using kinetic energy spectra. *Monthly weather review* 132(12) :3019–3032, URL <https://doi.org/10.1175/MWR2830.1>
- Slingo J, Bates P, Bauer P, Belcher S, Palmer T, Stephens G, Stevens B, Stocker T, Teutsch G (2022) Ambitious partnership needed for reliable climate prediction. *Nature Climate Change* 12(6) :499–503, URL <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01384-8>

- Soares PM, Careto JA, Cardoso RM, Goergen K, Katragkou E, Sobolowski S, Coppola E, Ban N, Belušić D, Berthou S, et al (2022) The added value of km-scale simulations to describe temperature over complex orography : the CORDEX FPS-Convection multi-model ensemble runs over the Alps. *Climate Dynamics* pp 1–24, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06593-7>
- Spiridonov V, Déqué M, Somot S (2005) ALADIN-CLIMATE : from the origins to present date. *ALADIN Newsletter* 29 :89–92
- Stein TH, Hogan RJ, Hanley KE, Nicol JC, Lean HW, Plant RS, Clark PA, Halliwell CE (2014) The three-dimensional morphology of simulated and observed convective storms over southern England. *Monthly Weather Review* 142(9) :3264–3283, URL <https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00372.1>
- Stocchi P, Pichelli E, Torres Alavez JA, Coppola E, Giuliani G, Giorgi F (2022) Non-Hydrostatic RegCM4 (RegCM4-NH) : Evaluation of Precipitation Statistics at the Convection-Permitting Scale over Different Domains. *Atmosphere* 13(6) :861, URL <https://doi.org/10.3390/atmos13060861>
- von Storch H, Langenberg H, Feser F (2000) A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes. *Monthly weather review* 128(10) :3664–3673, URL [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128<3664:ASNTFD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<3664:ASNTFD>2.0.CO;2)
- Survey UG (1993) Digital elevation models, data users guide 5. Reston, Virginia, US Geological Survey pp 1–50
- Szopa S, Balkanski Y, Schulz M, Bekki S, Cugnet D, Fortems-Cheiney A, Turquety S, Cozic A, Déandreis C, Hauglustaine D, Idelkadi A, Lathière J, Lefevre F, Marchand M, Vuolo R, Yan N, Dufresne JL (2013) Aerosol and ozone changes as forcing for climate evolution between 1850 and 2100. *Climate dynamics* 40 :2223–2250, DOI [10.1007/s00382-012-1408-y](https://doi.org/10.1007/s00382-012-1408-y)
- Tabary P, Dupuy P, Lhenaff G, Gueguen C, Moulin L, Laurantin O, Merlier C, Soubeyroux JM (2012) A 10-year (1997–2006) reanalysis of Quantitative Precipitation Estimation over France : methodology and first results. *IAHS-AISH publication* pp 255–260
- Taufour M (2018) Validation et amélioration du schéma microphysique à deux moments lima à partir des observations de la campagne de mesures hymex. PhD thesis, Université Paul Sabatier-Toulouse III
- Tegen I, Hollrig P, Chin M, Fung I, Jacob D, Penner J (1997) Contribution of different aerosol species to the global aerosol extinction optical thickness : Estimates from model results. *Journal of Geophysical Research* 102 :23,895–23,915, URL <https://doi.org/10.1029/97JD01864>
- Termonia P, Fischer C, Bazile E, Bouyssel F, Brožková R, Bénard P, Bochenek B, Degrauwe D, Derková M, El Khatib R, et al (2018) The ALADIN System and its canonical

- model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. *Geoscientific Model Development* 11(1) :257, URL <https://doi.org/10.5194/gmd-11-257-2018>
- Torma C, Giorgi F, Coppola E (2015) Added value of regional climate modeling over areas characterized by complex terrain—Precipitation over the Alps. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 120(9) :3957–3972, URL <https://doi.org/10.1002/2014JD022781>
- Tramblay Y, Somot S (2018) Future evolution of extreme precipitation in the Mediterranean. *Climatic Change* 151(2) :289–302, URL <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2300-5>
- Tramblay Y, Mimeau L, Neppel L, Vinet F, Sauquet E (2019) Detection and attribution of flood trends in Mediterranean basins. *Hydrology and Earth System Sciences* 23(11) :4419–4431, URL <https://doi.org/10.5194/hess-23-4419-2019>
- Vautard R, Yiou P, van Oldenborgh GJ, Lenderink G, Thao S, Ribes A, Planton S, Dubuisson B, Soubeyroux JM (2015) Extreme fall 2014 precipitation in the Cévennes mountains. *Bulletin of the American Meteorological Society* 96(12) :S56–S60, URL <http://www.jstor.org/stable/26233141>
- Vautard R, Kadyrov N, Iles C, Boberg F, Buonomo E, Bülow K, Coppola E, Corre L, van Meijgaard E, Nogherotto R, et al (2021) Evaluation of the large EURO-CORDEX regional climate model ensemble. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 126(17) :e2019JD032,344, URL <https://doi.org/10.1029/2019JD032344>
- Vidal JP, Martin E, Franchistéguy L, Baillon M, Soubeyroux JM (2011) A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology* 30(11) :1627–1644, URL <https://doi.org/10.1002/joc.2003>
- Voltaire A, Sanchez-Gomez E, y Méliá DS, Decharme B, Cassou C, Sénési S, Valcke S, Beau I, Alias A, Chevallier M, et al (2013) The CNRM-CM5. 1 global climate model : description and basic evaluation. *Climate Dynamics* 40(9-10) :2091–2121, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1259-y>
- de Vries H, Lenderink G, van der Wiel K, van Meijgaard E (2022) Quantifying the role of the large-scale circulation on European summer precipitation change. *Climate Dynamics* 59(9-10) :2871–2886, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06250-z>
- Winterrath T, Brendel C, Hafer M, Junghänel T, Klameth A, Walawender E, Weigl E, Becker A (2017) Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie
- Wüest M, Frei C, Altenhoff A, Hagen M, Litschi M, Schär C (2010) A gridded hourly precipitation dataset for Switzerland using rain-gauge analysis and radar-based disaggregation. *International Journal of Climatology* 30(12) :1764–1775, URL <https://doi.org/10.1002/joc.2025>

- Yang D, Ishida S, Goodison BE, Gunther T (1999) Bias correction of daily precipitation measurements for Greenland. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 104(D6) :6171–6181, URL <https://doi.org/10.1029/1998JD200110>
- Zappa G, Shepherd TG (2017) Storylines of atmospheric circulation change for European regional climate impact assessment. *Journal of Climate* 30(16) :6561–6577, URL <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0807.1>
- Zappa G, Shaffrey LC, Hodges KI, Sansom PG, Stephenson DB (2013) A multimodel assessment of future projections of north atlantic and european extratropical cyclones in the cmip5 climate models. *Journal of Climate* 26(16) :5846–5862, URL <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00573.1>
- Zittis G, Bruggeman A, Lelieveld J (2021) Revisiting future extreme precipitation trends in the Mediterranean. *Weather and Climate Extremes* 34 :100,380, URL <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100380>

Glossaire

- ANTILOPE** : Analyse par spatiaLisation hOraire des PrEcipitations
- ALADIN** : Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational
- AOD** : Aerosol Optical Depth
- ARAMIS** : Application RAdar à la Météorologie Infra-Synoptique
- AR6** : Sixth Assessment Report
- AROBASE** : Application de la Recherche à l'Opérationnel pour l'assemblage d'Arome avec des Systèmes Environnementaux ou AROME-BASEd coupled SystEm
- AROME** : Applications de la Recherche à l'Opérationnel à MésO-Echelle
- ARPEGE** : Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle
- BCCR** : Bjerknes Centre for Climate Research (Norvège)
- BTU** : Brandenburg University of Technology (Allemagne)
- CEN** : Centre d'Etude de la Neige
- CEPMMT** : Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme
- CERFACS** : Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
- CMIP** : Coupled Model Intercomparison Project
- CNRM** : Centre National de Recherches Météorologiques
- CNRS** : Centre National de la Recherche Scientifique
- COARE** : Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment
- COMAD** : COntinuous Mapping about Departure points
- COMEPHORE** : COmbinaison en vue de la Meilleure Estimation de la Précipitation HOraire
- CCLM** : COSMO-CCLM ou COnsortium for Small scale MOdelling in CLimate Mode
- CMCC** : Centro Euro-Mediterraneo sui Camnbiamenti Climatici (Italie)
- CORDEX** : Coordinated Regional Downscaling Experiment
- CP-RCM** : Convection-Permitting Regional Climate Model
- CTRIP** : Total Runoff Integrating Pathways
- CYPRIM** : CYclogénèses et PRécipitations Intenses en région Méditerranéenne
- DIROP/PI** : Direction des opérations pour la prévision - Prévision Immédiate
- DCSC/EMA** : Direction de la Climatologie et des Services Climatiques
- DHMZ** : Croatian Meteorological and Hydrological Service (Croatie)
- DMI** : Danmarks Meteorologiske Institut (Danemark)
- DWD** : Deutscher Wetterdienst (Allemagne)

DYMECS : Dynamical and Microphysical Evolution of Convective Storms
E-OBS : Earth OBServations
EC-Earth : European Center Earth System Model
ECMWF : European Center for Medium-range Weather Forecasts
ECUME : Exchange Coefficients from Unified Multicampaign Estimate
ERA : ECMWF Re-Analysis
ESM : Earth System Model
ETHZ : Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (Suisse)
EUCP : EUropean Climate Prediction
EURO-CORDEX : EUROpean Coordinated Regional Downscaling Experiment
EURO4M-APGD : European Reanalysis and Observations for Monitoring - Alpine
 Precipitation Grid Dataset

FPS : Flagship Pilot Study
FZJ : Research Centre Juelich, Institute of Bio- and Geosciences (Allemagne)
GCM : General Circulation Model
GES : Gaz à Effet de Serre
GEV : Generalized Extreme Value
GELATO : Global Experimental Leads and ice for ATmosphere and Ocean
GERICS : Climate Service Center Germany (Allemagne)
GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GMME : Groupe de Météorologie de Moyenne Echelle
GMGEC : Groupe de Météorologie de Grande Échelle et Climat
GPU : Graphics Processing Unit
GUF : Goethe University Frankfurt (Allemagne)

HadGEM-ES : Hadley Centre Global Environment Model Earth System
HCLIMcom : Harmonie-Climate community
HIWE : High Impact Weather Event
HPE : Heavy Precipitation Event
HyMeX : Hydrological cycle in the Mediterranean eXperiment

ICON : Icosahedral Nonhydrostatic Weather and Climate Model
ICTP : International Centre for Theoretical Physics (Italie)
IAF : maximum Intensity maximum Area Frequency
IDF : maximum Intensity Duration Frequency
IDL : Instituto Dom Luiz (Portugal)
IFS : Integrated Forecasting System
IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change
IPSL : Institut Pierre Simon Laplace
ISBA : Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère

JLU : Center for Environmental Systems Research (CESR), University of Kassel
 (Allemagne)
KIT : Karlsruhe Institute of Technology (Allemagne)

KNMI : Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (Pays-Bas)

LBC : Lateral Boundary Condition

MCS : Mesoscale Convective System

MPI-ESM : Max Planck Institute Earth System Model

Med-CORDEX : Mediterranean Coordinated Regional Downscaling Experiment

MedECC : Mediterranean Experts on Climate and environmental Change

Méso-NH : Mésoscale Non-Hydrostatique

MODE : Method for Object-Based Diagnostic Evaluation

MOHC : Met Office Hadley Centre

NEMO : Nucleus for European Modelling of the Ocean

OASIS : Ocean Atmosphere Sea Ice Soil

OPERA : Operational Programme for the Exchange of Weather Radar Information

OPIC : Objet de Prévision Immédiate de la Convection

OSIRIS : Outil de Suivi dans l'Imagerie Radar et Infra-rouge Satellitaire

PCMT : Prognostic Condensates Microphysics and Transport

PGW : Pseudo Global Warming

PNT : Prévision Numérique du Temps

RADKLIM : RADAR KLIMatologie

RCM : Regional Climate Model

RCP : Representative Concentration Pathways

RDT : Rapid Developing Thunderstorm

RegCM : REGional Climate Model system

RX1day : Maximum annuel de précipitation quotidienne

REMO : REgional MOdel

SAFRAN : Systeme d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige

SIC : Sea Ice Cover

SMHI : Swedish Meteorological and Hydrological Institute (Suède)

SST : Sea Surface Temperature

SURFEX : SURFace EXternalisée

TEB : Town Energy Balance

TEI : Temps Ecoulé Intégré

TKE : Turbulence Kinetic Energy

TRIP : Total Runoff Integrating Pathways

UKMO : United Kingdom Met Office

UM : Unified Model

WCRP : World Climate Research Program

WP : Working Group

WRF : Weather Research and Forecasting

Table des figures

1.1	La tempête Alex vue par le satellite Suomi-NPP le 2 octobre 2020 à 1h19 UTC, ainsi que l'épisode méditerranéen à travers les réflectivités radar superposées aux images satellitaires infrarouge toutes les six heures entre le 2 octobre 00 UTC et le 3 octobre 06 UTC	2
1.2	Ingrédients et situation météorologique associés à l'épisode méditerranéen des 2-3 octobre 2020 sur les Alpes Maritimes	3
1.3	(a) Carte de vigilance émise par Météo-France associée à l'épisode méditerranéen des 2-3 octobre 2020; (b) Cumuls de précipitation en 24h sur les Alpes-Maritimes entre le 2 octobre 06 UTC et le 3 octobre 06 UTC; (c) Cumuls horaires de précipitation à la station de Coursegoules du 2 octobre 06 UTC au 3 octobre 06 UTC	4
1.4	Les conséquences de l'épisode méditerranéen des 2-3 octobre 2020 sur les Alpes-Maritimes	5
1.5	Le climat méditerranéen parmi les régions climatiques françaises et les normales mensuelles de précipitation pour la période 1991-2020 pour la ville de Nîmes dans le Gard (hauteur en mm et nombre de jours de pluie > 1 mm)	6
1.6	Quelques épisodes méditerranéens marquants touchant le nord-ouest de la Méditerranée et la topographie de ces régions avec une mer intercontinentale presque entièrement fermée dont les côtes sont bordées de nombreux reliefs	7
1.7	Épisodes de plus de 200 mm en 1 jour pour la période 1971-2020 : fréquence par département sur la France métropolitaine et par station de mesure sur le sud-est du pays	7
1.8	Le programme international HyMeX et ses différentes campagnes de mesure	8
1.9	La situation météorologique et les ingrédients associés aux épisodes méditerranéens (d'après www.meteo-france.fr)	9
1.10	(a) Distribution mensuelle du nombre de HPEs supérieurs à 150 mm sur le sud de la France pour la période 1967-2006 (Ricard et al, 2012); (b) Ecarts à la normale des températures de surface de la mer dans le cas de deux épisodes méditerranéens d'octobre 2020 associés à des cumuls supérieurs à 500 mm (Ducrocq, 2020)	10
1.11	Illustration de cellule en V, forme prise par le système nuageux s'étendant des Pyrénées-Orientales à l'ouest du Massif central avec l'image infrarouge Météosat du 12 novembre 1999 à 23 UTC (Ducrocq et al, 2003)	12
1.12	Les étapes de prévision d'un épisode méditerranéen au fil des échéances . .	14

1.13	Coûts des dégâts dus aux inondations pour les assureurs entre 1989 et 2016 pour les sinistres supérieurs à 50 millions d’euros	15
1.14	Écart à la référence 1961-1990 des températures moyennes annuelles pour la ville de Perpignan pour la période 1959-2020	16
1.15	Illustration de la loi de Clausius-Clapeyron	17
1.16	Evolution de l’intensité des pluies extrêmes en région méditerranéenne entre 1961 et 2017 adapté de Ribes et al (2019) et de la fréquence d’événements supérieurs à 200 mm/j (Ribes et al, 2019)	18
1.17	Les différents modèles de climat et la topographie de la France vue par des modèles de différentes résolutions	20
1.18	Le cas de l’épisode méditerranéen des 30 et 31 octobre 2010 vu par des modèles de climat de résolutions différentes avec comparaison aux observations (COMEPHORE sur la France et GRIPHO sur l’Italie)	21
1.19	Comparaison des percentiles 99% des précipitations quotidiennes (en mm/j) pour l’automne (SON) pour la période 1989-2008 entre les observations (SAFRAN, 8 km), les RCMs COSMO-CLM et CNRM-ALADIN à 12 km, et le GCM CNRM-CM5 à 150 km (Ruti et al, 2016)	21
1.20	Cumuls de précipitation en mm pour le cas HyMeX-IOP16 pour les observations, la moyenne de l’ensemble multi-modèle et le membre AROME-CNRM pour le mode Weather like et le mode Climate mode (Coppola et al, 2020)	24
1.21	Moyenne des valeurs supérieures au percentile 99% des précipitations quotidiennes de l’automne (SON) en mm/j pour (a) UM-UKMO 12 km, (b) UM-UKMO 2.2 km, (d) CCLM-ETHZ 12 km, (e) CCLM-ETHZ 2.2 km et (f) observations disponibles : composite de CMORPH et produits régionaux grillés, comme indiqué dans le panneau (c) (Berthou et al, 2020)	25
1.22	Distribution spatiale du percentile 99.9% des précipitations horaires (mm/h) pour les observations de COMEPHORE (1 km) (a), pour le RCM CNRM-ALADIN (12.5 km) (b) et pour le CP-RCM CNRM-AROME (2.5 km) (c), interpolés sur une grille commune à 12.5 km, pour l’automne élargi (SOND) entre 1997 et 2006 (Fumière et al, 2020)	26
1.23	Queues de fonction de distribution cumulative (SOND, 1997-2006) sur la boîte Cévennes pour les précipitations quotidiennes (a) et (c) et les précipitations horaires (b) et (d), interpolées sur la grille à 12.5 km sur la première ligne et 2.5 km sur la deuxième ligne, pour CNRM-AROME, CNRM-ALADIN et les observations COMEPHORE et SAFRAN (Fumière et al, 2020)	27
1.24	(a) Contribution aux incertitudes pour les changements de précipitations moyennes décennales de la variabilité interne (orange), l’incertitude du modèle (bleu) et l’incertitude du scénario (vert) pour l’hiver (DJF) et l’Europe (Hawkins and Sutton, 2011); (b) Les différentes contributions aux incertitudes pour les changements relatifs de précipitations totales (pr) en hiver (DJF) et en été (JJA) en fonction du temps par rapport à la période 1981-2010 pour la zone Méditerranée (Evin et al, 2021)	28

1.25	Les valeurs ajoutées potentielles des RCMs par rapport aux GCMs et des CP-RCMs par rapport aux RCMs et leurs échelles spatiales - Figure adaptée du cours de modélisation régionale du climat de S. Somot - doi :10.5281/zenodo.4586910	29
1.26	Evolution des anomalies de températures moyennes annuelles (a) et de précipitations moyennes annuelles (b) au cours du 21e siècle par rapport à la période de référence du passé récent (1980-1999) sur la base de la moyenne d'un ensemble de simulations EURO-CORDEX de RCMs (12km) forcés par des GCMs de CMIP5 pour la zone Méditerranée terrestre pour les scénarios RCP2.6 et RCP8.5. Figures issues du rapport MAR1 (Cramer et al, 2020)	33
1.27	Changements observés et projetés (à des niveaux de réchauffement global de 1,5°C et 4°C) des principaux indicateurs climatiques et les niveaux de confiance associés pour quatre sous-régions terrestres de la zone Méditerranée. Figure CCP4.3 issue de l'AR6 du GIEC WG2 (Ali et al, 2022)	34
1.28	Changements des précipitations quotidiennes maximales annuelles (RX1day) pour (a) 1,5°C, (b) 2°C, et (c) 4°C de réchauffement global par rapport à la référence de 1850-1900 pour un ensemble multi-modèle de GCMs de CMIP6 pour les scénarios SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, et SSP5-8.5. Les chiffres en haut à droite indiquent le nombre de simulations incluses. Régions hachurées où l'accord entre les modèles est faible, c'est-à-dire où <80% des modèles s'accordent sur le signe du changement. Figure 11.16 de l'AR6 WG1 Chapitre 11 du GIEC	35
1.29	Changements des précipitations quotidiennes maximales annuelles (RX1day) (en % par degré de réchauffement) pour la période 1950-2100 pour un ensemble multi-modèle de GCMs de CMIP5 (a) totaux (b) dus à la contribution thermodynamique (c) dus à la contribution dynamique. Régions hachurées où l'accord entre les modèles est faible, c'est-à-dire où <80% des modèles s'accordent sur le signe du changement. Box 11.1, Figure 1 de l'AR6 WG1 Chapitre 11 du GIEC, adaptée de Pfahl et al (2017)	36
1.30	(a) Changements des maxima annuels de précipitation quotidienne en pourcentage pour la période 2071–2100 par rapport à 1981–2010 pour un ensemble de 55 simulations de RCMs d'EURO-CORDEX selon le RCP8.5 (Coppola et al, 2021a) (b) Nombre de simulations de RCMs présentant des tendances non paramétriques significatives positives (en bleu) et négatives (en rouge) des maxima annuels de précipitation quotidienne pour le 21e siècle pour un ensemble de 33 simulations de RCMs d'EURO-CORDEX selon le RCP8.5 (Zittis et al, 2021)	37
1.31	Evolution des précipitations extrêmes quotidiennes de durée de retour de 20 ans en pourcentage par bassin versant sur le pourtour méditerranéen à partir d'un ensemble de 11 simulations de RCMs d'EURO-CORDEX suivant le scénario RCP8.5 (Tramblay and Somot, 2018)	37

1.32	Changements des percentiles 99.9% de précipitation horaire par degré de réchauffement (%/°C) entre les périodes historique (1996-2005) et fin de siècle (2090-2099) pour un ensemble de quatre CP-RCMs pour le sud-est de la France (Fumière, 2019)	39
1.33	Comparaison des changements des percentiles 99.9% de précipitation horaire par degré de réchauffement (%/°C) entre les périodes historique et fin de siècle pour le CP-RCM CNRM-AROME entre trois périodes de 10 ans et une période de 30 ans (Fumière, 2019)	40
1.34	Les différents sous-domaines européens définis dans le cadre du projet EUCP et le domaine commun ALP-3 du FPS Convection (Figure : C. Caillaud) .	41
1.35	Les approches eulérienne et lagrangienne pour l'étude des pluies extrêmes en climat	42
1.36	(a) Illustration de l'algorithme MODE, utilisé pour le suivi lagrangien des MCSs avec les cumuls horaires de précipitations supérieures à 5 mm/h, suivis dans l'espace et le temps (le temps correspond à l'axe vertical) (Prein et al, 2017) (b) Illustration de l'algorithme développé à l'Université de Francfort avec les probabilités de détection et un instantané d'image radar 5 min avec la détection d'une cellule et sa trajectoire matérialisée par une ligne rouge (Purr et al, 2019) (c) Illustration de l'algorithme TOOCAN de détection des MCSs sous les Tropiques en quatre dimensions à partir des températures de brillance d'images satellitaires infrarouge (Fioleau and Roca, 2013) (d) Illustration de l'outil OPIC-radar (Objet de Prévision Immediate de la Convection) utilisé à Météo-France en prévision immédiate pour le suivi et la qualification des zones orageuses à partir des images réflectivités radar 5 min (Source : Météo-France)	44
2.1	Les bases de données d'observation de précipitation utilisées pour les analyses quotidiennes (à gauche) et horaires (à droite), limitées au domaine d'analyse ALP-3i qui est défini dans la Section 2.6.1	54
2.2	A gauche, carte du réseau français de pluviomètres quotidiens en 2011 (3825 stations); au milieu et à droite, cartes de la qualité de la mesure radar des précipitations pour le réseau radar français en 2007 et 2016. Source : Météo-France	55
2.3	La chaîne de modélisation du GCM au CP-RCM, en passant par le RCM .	59
2.4	Les domaines EURO-CORDEX (nlat=480 et nlon=480, soit 230 400 points) et Med-CORDEX (nlat=288 et nlon=432, soit 124 416 points) de CNRM-ALADIN à 12.5 km	60
2.5	Les niveaux verticaux de CNRM-AROME et de CNRM-ALADIN avec un zoom sur les 32 premiers kilomètres, puis sur les 7 kilomètres les plus proches du sol	63
2.6	Le modèle CNRM-AROME41t1 : dynamique, paramétrisations physiques et plateforme de modélisation de la surface	64
2.7	Les différents domaines de CNRM-AROME à 2.5 km	66

2.8	Les différents éléments pour réaliser une simulation climatique régionale avec CNRM-AROME (adapté du cours de modélisation régionale du climat de S. Somot)	67
2.9	La grille d'un modèle spectral à aire limitée avec les zones centrale (C), intermédiaire (I) et d'extension (E), ainsi que le nombre de points de grille pour le domaine ALP-3	68
2.10	Zoom sur les deux premiers mois d'une simulation avec CNRM-AROME (adapté du cours de modélisation régionale du climat de S. Somot)	70
2.11	Schéma d'une simulation climatique avec CNRM-AROME	71
2.12	Les périodes des différentes simulations de CNRM-AROME sur le domaine ALP-3	73
2.13	Protocole de la simulation d'évaluation pour le CP-RCM CNRM-AROME sur le domaine ALP-3	74
2.14	Comparaison des concentrations de CO ₂ pour les différentes simulations de CNRM-ALADIN et CNRM-AROME suite à l'erreur dans les valeurs annuelles de gaz à effet de serre pour CNRM-AROME	76
2.15	Exemple de suivi de cellules supérieures à 10 mm/h pour la trajectoire principale dans le cas de l'épisode méditerranéen des Alpes-Maritimes entre 06 et 23 UTC le 2 octobre 2020. Pour chaque heure, à gauche, les cumuls de précipitation en une heure observés et à droite, les cellules sélectionnées, les informations associées (centre de gravité, intensité moyenne, maximale, surface et vitesse de propagation) et la trajectoire qui se dessine en pointillé blanc au fur et à mesure du déplacement de système	84
2.16	Schéma illustrant les étapes de l'algorithme de détection et de suivi des systèmes précipitants	86
2.17	Exemple de distribution spatiale du nombre moyen annuel de cellules au-dessus du seuil de 10 mm/h pour les trajectoires obtenues à partir des données observées (COMEPHORE), en automne (SOND) et pour la période 1997-2016	88
2.18	Exemple de graphes d'IDF (maximum Intensity Duration Frequency) et d'IAF (maximum Intensity maximum Area Frequency) pour les trajectoires observées (COMEPHORE) dans le sud-est de la France, en automne (SOND) pour la période 1997-2016	89
2.19	Exemple de graphique à bulles ou "Bubble plot" pour les dix trajectoires les plus sévères observés (COMEPHORE) dans le sud-est de la France en automne (SOND) entre 1997 et 2016 et le cas des Alpes-Maritimes des 2-3 octobre 2020	90

2.20	Topographie de CNRM-AROME pour la zone centrale physique (C) du domaine pan-alpin et domaine commun du FPS Convection, ALP-3i, délimité par des lignes grises. Dans les Figures (a) et (b), les domaines de tracking sont délimités par des lignes noires et la zone French MED par des lignes noires en pointillée. Le domaine de tracking de (a) est utilisé pour l'évaluation de CNRM-AROME pour l'article Caillaud et al (2021) afin que la zone de tracking corresponde exactement à la zone de tracking pour les données observées de COMEPHORE. La zone de tracking de (b) est celle utilisée pour toutes les autres évaluations et pour l'analyse des projections. On remarquera que la zone French MED diffère légèrement selon le domaine de tracking (a) et (b), mais elle sera toujours choisie de manière identique lorsque des comparaisons seront faites	91
3.1	Extrêmes quotidiens (a,b,c) et horaires (d,e,f) de précipitation de l'automne SON (percentiles 99% des précipitations quotidiennes et 99.9% des précipitations horaires) pour les simulations d'évaluation de dix ans (2000-2009) pour (a,d) un ensemble de 23 CP-RCMs du FPS Convection (2-3 km), (b,e) un ensemble de 22 RCMs (12-15 km) et (c,f) les observations, d'après Ban et al (2021)	137
3.2	Extrêmes horaires de précipitation de l'automne SON (percentiles 99.9% des précipitations horaires) pour les simulations d'évaluation de dix ans (2000-2009, SON) des 23 CP-RCMs du FPS Convection (2-3 km) et des 22 RCMs (12-15 km), comparées aux observations d'après Ban et al (2021)	138
3.3	Positionnement des différentes simulations dans les figures multi-modèles en fonction des familles de CP-RCM (une couleur par famille de CP-RCM) avec des symboles différents par institut au sein d'une même famille. * CCLM-JLU et UM-UKMO : forçage direct à partir de la réanalyse ERA-Interim Pour UM-UKMO : domaine pan-européen REU-2 Pour CCLM-GUF : domaine méditerranéen MED-3	139
3.4	Distribution spatiale du nombre moyen par an de cellules supérieures à 10 mm/h pendant l'automne (SOND) pour (a) les observations (2001-2010), (b) la moyenne multi-modèle des simulations d'évaluation (2000-2009) et (c) les différences brutes entre la moyenne multi-modèle et les observations avec les RMSEs indiquées pour les sous-domaines France et Italie. Sur toutes les figures, l'orographie (750 m) est représentée par des lignes marrons . . .	140
3.5	Distribution spatiale du nombre moyen par an de cellules supérieures à 10 mm/h pendant l'automne (SOND) pour les simulations d'évaluation (2000-2009) pour la moyenne multi-modèle et les 14 CP-RCMs. Sur toutes les figures, l'orographie (750 m) est représentée par des lignes marrons	142

3.6	Différences brutes des nombres moyens par an de cellules supérieures à 10 mm/h pendant l'automne (SOND) entre les simulations d'évaluation (2000-2009) et les observations (2001-2010) pour la moyenne multi-modèle et les 14 CP-RCMs. Les RMSEs sont indiquées pour les sous-domaines France et Italie, pour chaque simulation. Sur toutes les figures, l'orographie (750 m) est représentée par des lignes marrons	143
3.7	(a) Différences relatives des caractéristiques (en %) entre les simulations d'évaluation et les observations pour la moyenne multi-modèle et les 14 CP-RCMs (une couleur par famille de CP-RCM et un symbole par CP-RCM). Graphes d'IDF (b,c,d) et d'IAF (e,f,g) pour les observations (b,e), la moyenne multi-modèle des simulations d'évaluation (c,f) et leurs différences (d,g). Nous considérons toutes les trajectoires de cellules supérieures à 10 mm/h lors de journées dépassant 100 mm/j dans la zone French MED pendant l'automne (SOND) et pour la période 2000-2009	145
3.8	Graphes d'IDF pour la moyenne multi-modèle et les 14 CP-RCMs (le nombre moyen de trajectoires par an est donné pour chaque simulation). Nous considérons toutes les trajectoires de cellules supérieures à 10 mm/h lors de journées dépassant 100 mm/j dans la zone French MED pendant l'automne (SOND) et pour la période 2000-2009	146
3.9	Différences d'IDF pour la moyenne multi-modèle et les 14 CP-RCMs (la différence de nombre moyen de trajectoires par an est donnée pour chaque simulation). Nous considérons toutes les trajectoires de cellules supérieures à 10 mm/h lors de journées dépassant 100 mm/j dans la zone French MED pendant l'automne (SOND) et pour la période 2000-2009	147
3.10	Identique à la Figure 3.8, mais pour les graphes d'IAF	148
3.11	Identique à la Figure 3.9, mais pour les graphes d'IAF	149
3.12	Différences relatives des caractéristiques (en %) entre les simulations d'évaluation et les observations pour la moyenne multi-modèle et les 14 CP-RCMs (une couleur par famille de CP-RCM et un symbole par CP-RCM) pour les trajectoires les plus intenses. Nous considérons ici toutes les trajectoires de cellules supérieures à 10 mm/h lors de journées dépassant 100 mm/j dans la zone French MED pendant l'automne (SOND) et pour la période 2000-2009 et dont l'intensité maximale dépasse le percentile 97 % des intensités maximales calculé pour chaque simulation	151
3.13	Biais relatif pour (a) la moyenne et (b) le percentile 90 des propriétés des trajectoires sélectionnées pour chaque outil de tracking pour la moyenne de l'ensemble du FPS Convection par rapport aux observations (en %). Les lignes noires pleines sont des incréments de +-5%, la ligne noire en gras représente les observations, c'est-à-dire 0% (Müller et al, 2022)	154

4.1	Extrêmes horaires de précipitation de l'automne (percentiles 99.9% des précipitations horaires) pour les simulations historiques de dix ans (1996-2005, SON) pour (a) un ensemble de 12 CP-RCMs du FPS Convection (2-3 km), (b) un ensemble de 12 RCMs (12-15 km), d'après Pichelli et al (2021), pour des simulations historiques de 20 ans (1986-2005, SON) pour (c) le CP-RCM CNRM-AROME (2.5 km), (d) le RCM CNRM-ALADIN (12.5 km) et (e) les observations (COMEPHORE sur la France et GRIPHO sur l'Italie). Sur toutes les figures, l'orographie (750 m) est représentée par des lignes marrons	161
4.2	Changements relatifs des extrêmes quotidiens de précipitation de l'automne (percentiles 99% des précipitations quotidiennes) entre les simulations fin de siècle (2090-2099) et historique (1996-2005) pour des simulations de 10 ans en automne (SON) pour (a) un ensemble de 12 CP-RCMs du FPS Convection (2-3 km) et (b) un ensemble de 12 RCMs (12-15 km), ainsi que le box-plot de la distribution des changements pour les CP-RCMs et les RCMs pour les zones France et Sud France, d'après Pichelli et al (2021), et pour des simulations de 20 ans (1986-2005 et 2080-2099) en automne (SON) pour (c) le CP-RCM CNRM-AROME (2.5 km) et (d) le RCM CNRM-ALADIN (12.5 km) (les différences ne sont tracées que si elles sont significatives à 90% selon une méthode de bootstrap). Sur toutes les figures, l'orographie (750 m) est représentée par des lignes marrons.	162
4.3	Identique à la Figure 4.2, mais pour les changements des extrêmes horaires de précipitation de l'automne (percentiles 99.9% des précipitations horaires)	164
4.4	Différences relatives des caractéristiques (en %) entre les simulations d'évaluation et les observations (2000-2009) pour (a) et entre pour les simulations historiques (1996-2005) et les observations (2001-2016) pour (b) pour la moyenne multi-modèle et les 14 CP-RCMs. On retrouve la même couleur par famille de CP-RCM pour les deux figures, mais les symboles diffèrent : un symbole par CP-RCM pour (a) et un symbole par GCM pour (b) . . .	218
5.1	Graphique à bulles des 10 trajectoires les plus sévères pour la période historique (en orange) et pour la période fin de siècle (en rouge) pour CNRM-AROME	238
5.2	Illustration de l'approche "storyline". Communication personnelle S. Somot. D'après Zappa and Shepherd (2017); Shepherd (2019)	239
5.3	Comparaison des percentiles 99% annuels de précipitation quotidienne simulés par le RCM CNRM-ALADIN forcé par CNRM-CM5 et par l'émulateur pour le scénario RCP4.5, après apprentissage sur une paire HIST/RCP85 de CNRM-CM5/CNRM-ALADIN. Communication personnelle A. Doury .	240

Liste des tableaux

1.1	Comparaison des outils de modélisation climatique pour l'étude des épisodes méditerranéens	32
2.1	Les principales caractéristiques des bases de données d'observation utilisées . . .	54
2.2	Les paramétrisations physiques de CNRM-ALADINv6 et CNRM-AROME41t1 .	61
2.3	Les paramétrisations de surface de CNRM-ALADINv6 et CNRM-AROME41t1 .	62
2.4	Caractéristiques des simulations d'évaluation avec CNRM-ALADIN et CNRM-AROME utilisées dans la thèse	75
2.5	Tableau descriptif des simulations historiques et futures avec CNRM-ALADIN et CNRM-AROME utilisées dans cette thèse	77
2.6	Tableau des simulations d'évaluation de l'ensemble FPS Convection utilisées dans la thèse pour l'évaluation lagrangienne. Le nom de chaque simulation est composé du nom du CP-RCM et de celui de l'institut qui a réalisé la simulation. MED est le domaine Med-CORDEX et EUR, le domaine EURO-CORDEX. PS lorsque l'option de pilotage spectral est activée	81
2.7	Tableau des simulations de l'ensemble du FPS Convection utilisées dans la thèse pour les projections climatiques. Le nom de chaque simulation est composé du nom du CP-RCM et de celui de l'institut qui a réalisé la simulation	82
2.8	Les principales caractéristiques de chaque trajectoire	87
4.1	Changements relatifs des extrêmes quotidien et horaire de précipitation de l'automne entre les simulations fin de siècle et historique pour les zones France et Sud France pour la moyenne des ensembles de 12 CP-RCMs et de 12 RCMs de Pichelli et al (2021) (les valeurs minimales et maximales sont indiquées entre crochets), ainsi que les valeurs de CNRM-AROME et CNRM-ALADIN pour les périodes de 10 ans de Pichelli et al (2021) et pour les périodes de 20 ans (les valeurs entre parenthèses correspondent aux valeurs calculées seulement sur les points où les différences sont statistiquement significatives à 90% selon une méthode de bootstrap).	163