



HAL
open science

LES NOUVELLES PROJECTIONS CLIMATIQUES DE RÉFÉRENCE DRIAS 2020

Jean-Michel Soubeyroux, Sébastien Bernus, Lola Corre, Agathe Drouin, Brigitte Dubuisson, Pierre Etchevers, Patrick Josse, Maryvonne Kerdoncuff, Raphaëlle Samacoits, Flore Tocquer

► **To cite this version:**

Jean-Michel Soubeyroux, Sébastien Bernus, Lola Corre, Agathe Drouin, Brigitte Dubuisson, et al.. LES NOUVELLES PROJECTIONS CLIMATIQUES DE RÉFÉRENCE DRIAS 2020. Meteo-France. 2020, pp.98. <hal-04720972>

HAL Id: hal-04720972

<https://hal.science/hal-04720972v1>

Submitted on 4 Oct 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.

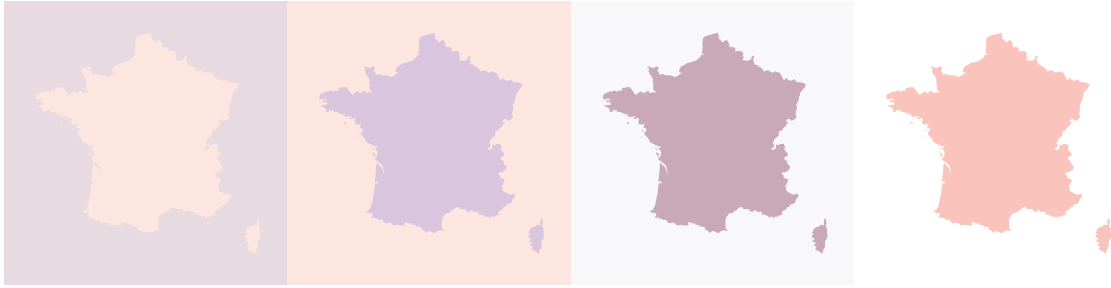
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



ETALAB - Open licence



**LES NOUVELLES PROJECTIONS
CLIMATIQUES DE RÉFÉRENCE
DRIAS 2020
POUR LA MÉTROPOLE**



Toutes les observations recueillies à l'échelle planétaire confirment à présent une accélération sans précédent du changement climatique et les conséquences de ce dérèglement se multiplient : vague de chaleur et incendies en Sibérie, fonte de la banquise en Arctique, sécheresses, canicules et record de températures sur tous les continents, évènements extrêmes tels que cyclones ou pluies intenses.

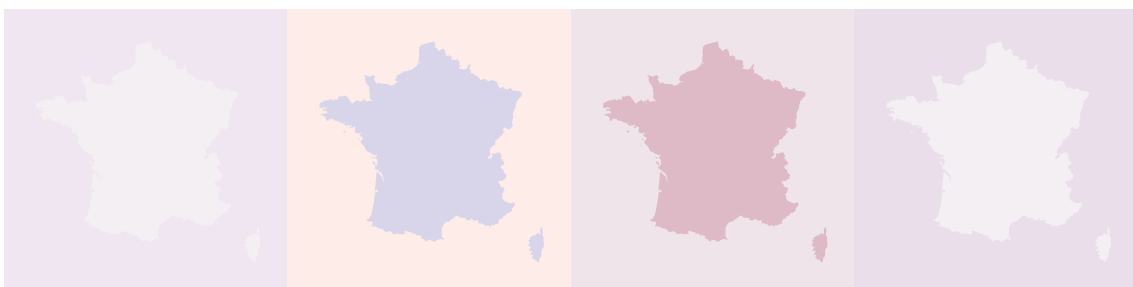
La France n'est pas épargnée, et il a été montré que les vagues de chaleur de l'été 2019 qui ont provoqué des températures inédites de 46°C dans le sud de la France et voisine de 43°C sur la région parisienne étaient une conséquence directe du changement climatique. La lutte contre le changement climatique est devenue une priorité internationale coordonnée dans le cadre de l'accord international de Paris sur le changement climatique. La France a renforcé ses objectifs de réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre d'ici 2050¹ et mis à jour son Plan National d'Adaptation au Changement Climatique². Les collectivités (régions et agglomérations) ainsi que les différents secteurs économiques définissent à leur tour leur stratégie de lutte et plan d'actions pour atténuer le changement climatique et s'adapter à ses effets.

Plus que jamais, toutes ces démarches ont besoin de s'appuyer sur des données climatiques à jour, fiables, précises et utiles pour la décision. Ce sont les objectifs du nouveau jeu de projections climatiques régionalisées DRIAS-2020, mis à disposition sur le portail partenarial DRIAS³ dont la mise à jour a été soutenue par le Ministère de la Transition Ecologique.

Ce présent document, préparé par les équipes de Météo-France, a pour objectif d'accompagner la publication de ce nouveau jeu DRIAS-2020, en apportant toutes les informations nécessaires pour faciliter son utilisation dans le cadre de l'élaboration, la mise en œuvre ou l'évaluation des démarches d'adaptation.



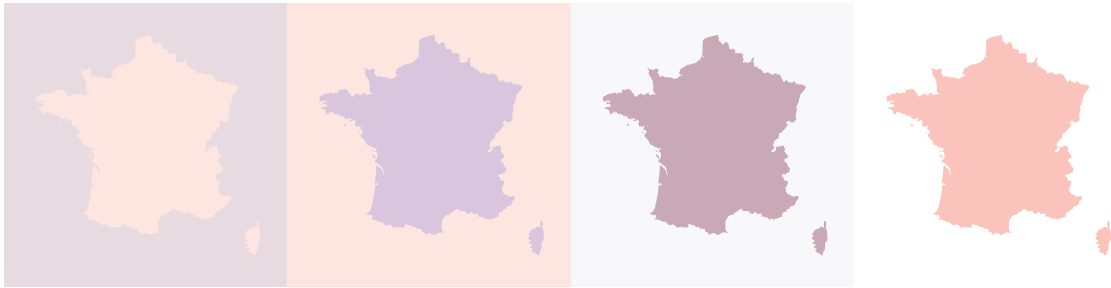
Virginie Schwarz,
Présidente-directrice générale
de Météo-France



1) Stratégie Nationale Bas Carbone mis à jour en avril 2020

2) Plan National d'Adaptation au Changement Climatique mis à jour en décembre 2018

3) DRIAS <http://www.drias-climat.fr/>, portail partenarial Météo-France, IPSL, CERFACS



INTRODUCTION

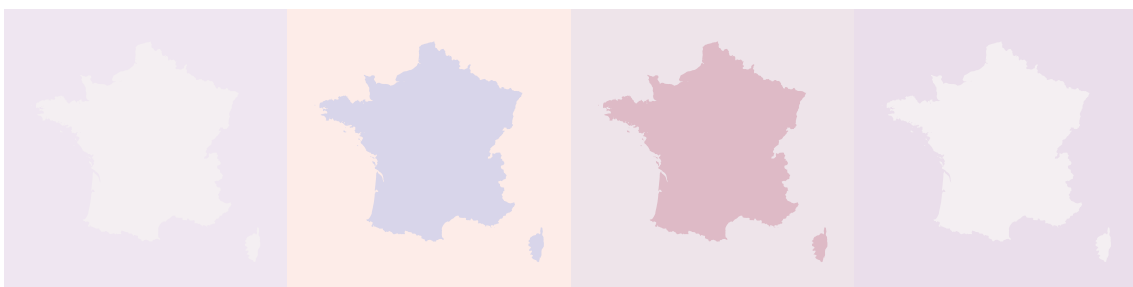
Le nouveau jeu DRIAS-2020 disponible sur le portail DRIAS, dont l'ergonomie a été revue par la même occasion, a été élaboré dans le cadre de la convention services climatiques soutenu par le Ministère de la Transition Ecologique, avec l'appui scientifique du CNRM, du CERFACS et de l'IPSL.

Trente simulations régionalisées issues de l'ensemble EuroCordex couvrant les trois scénarios climatiques RCP2.6, RCP4.5, et RCP8.5 ont été sélectionnées pour constituer un ensemble plus facilement utilisable pour des études d'impact que l'ensemble complet qui comporte plusieurs centaines de simulations.

Ce rapport a été élaboré pour constituer un guide scientifique et pratique à l'utilisation de ce jeu de données. Les différentes étapes de son élaboration sont explicitées, en insistant sur les critères de sélection des simulations pour leur représentativité des évolutions climatiques attendues sur la France au XXI^e siècle, considérées par rapport à des ensembles plus larges.

Une première valorisation de ce nouveau jeu de données est également proposée, avec des éléments de diagnostic climatique à partir d'indicateurs calculés sur les variables climatiques principales (température, précipitation, vent). Ces indicateurs sont représentatifs des évolutions moyennes mais aussi des extrêmes, ils sont déclinés pour différents horizons temporels (proche, milieu de siècle, fin de siècle) et trois scénarios climatiques (RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5).

Des encarts, des synthèses et des fiches « en savoir plus » ont été intégrés dans l'ensemble du document pour permettre différents niveaux de lecture et répondre aux principales questions que le lecteur pourrait se poser avant de se lancer dans l'utilisation de ces données.



SOMMAIRE

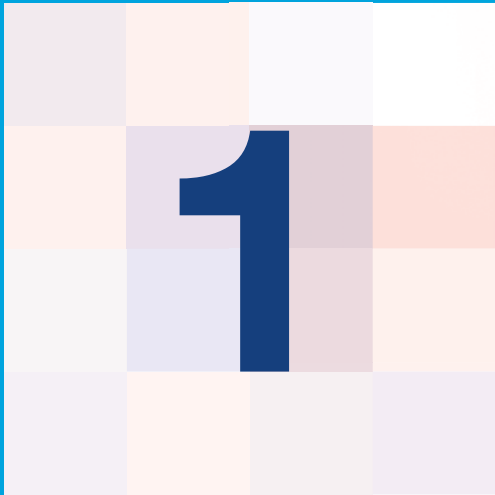
LE NOUVEAU JEUDRIAS 2020 6

SIMULER LE CLIMAT	8	Impact de la correction ADAMONT sur le changement climatique simulé	16
Les scénarios d'émission de gaz à effet de serre	8	SYNTHÈSE DE LA CONSTITUTION DU JEU DRIAS-2020	17
Les modèles climatiques	9		
LA SÉLECTION DES SIMULATIONS POUR LE JEU DRIAS-2020	12	LES INDICATEURS CLIMATIQUES	20
Les critères de sélection	12	Indicateurs sur les températures	21
Impact de la sélection DRIAS-2020 sur le changement climatique simulé	14	Indicateurs sur les précipitations	22
LA CORRECTION STATISTIQUE DES SIMULATIONS	15	Indicateurs sur le vent	22
La méthode ADAMONT	15	Des indicateurs « statistiques » en support à l'évaluation de l'incertitude	23

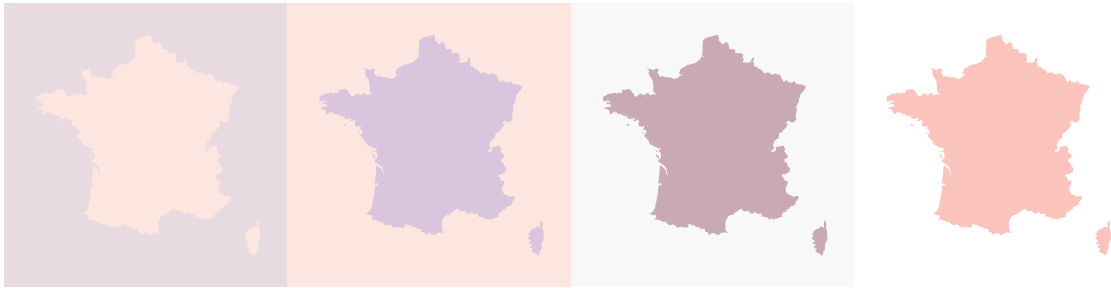
LE DIAGNOSTIC DU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN MÉTROPOLE 25

LA PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	27	Évolution des cumuls de précipitations saisonniers	39
La représentation des incertitudes	27	Synthèse pour les écarts de précipitations	40
La démarche	29	ÉVOLUTION DES ÉVÈNEMENTS EXTRÊMES	42
ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES	30	Évolution des vagues de chaleur et canicules	42
Évolution de la température moyenne annuelle	30	Évolution des vagues de froid et des journées de gel	49
Évolution des températures moyennes saisonnières	33	Évolution des pluies extrêmes	56
Synthèse pour les écarts de température moyenne	34	Évolution des sécheresses météorologiques estivales	60
ÉVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS	36	Évolution des vents forts	64
Évolution du cumul annuel de précipitations	36	SYNTHÈSE	68

EN SAVOIR PLUS SUR LE JEU DRIAS-2020		70	
<hr/>			
LES PRINCIPES DE LA MODÉLISATION CLIMATIQUE	71	ÉVOLUTION DE LA CIRCULATION GÉNÉRALE DANS LE JEU DRIAS-2020	81
<hr/>		<hr/>	
LES SIMULATIONS RÉGIONALISÉES EURO-CORDEX	74	LES INDICATEURS DRIAS	84
<hr/>		<hr/>	
LA MÉTHODE ADAMONT	76	LA COMPARAISON DES JEUX DRIAS-2020 ET DRIAS-2014	88
<hr/>		<hr/>	
BIBLIOGRAPHIE		96	
<hr/>			



LE NOUVEAU JEU
DRIAS 2020

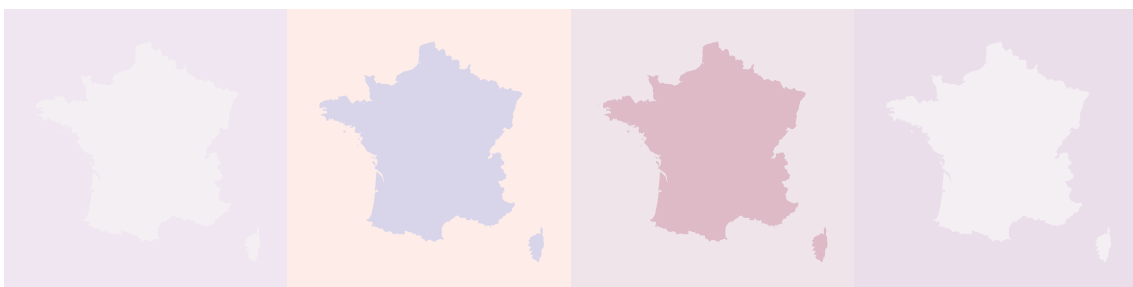


Le jeu de données DRIAS-2020 s'appuie sur des simulations climatiques régionales à haute résolution issues de l'ensemble Euro-CORDEX1 et corrigées par une méthode statistique.

On présente dans ce premier chapitre la démarche suivie pour élaborer ce nouveau jeu de données, et les principaux éléments qui ont guidé les choix effectués.

Des encarts complètent cette présentation au fil de la démarche pour éclairer ces choix.

Des renvois sont effectués vers des fiches « En savoir plus » à la fin de ce rapport pour disposer d'une information complète sur les différents sujets.



¹⁾ simulations disponibles fin 2019.

1.1 SIMULER LE CLIMAT

L'étude de l'évolution du climat nécessite le recours à des modèles physiques qui prennent en compte l'ensemble des équations décrivant le comportement du système climatique (composé de l'atmosphère, l'océan, les glaces marines, la végétation, les rivières...), en réponse à différentes contraintes, appelées forçages climatiques.

Les forçages climatiques sont des perturbations d'origine extérieure au système climatique qui impactent son bilan radiatif, c'est à dire la différence entre l'énergie reçue en provenance du Soleil et l'énergie rayonnée par la Terre vers l'espace. Ils sont de deux types : naturels, notamment liés aux variations du rayonnement solaire et aux éruptions volcaniques, ou anthropiques, dus aux activités humaines.

La pression exercée par l'homme sur le climat date principalement du début de l'ère industrielle au XIX^e siècle. La combustion d'énergie fossile ainsi que la modification de l'utilisation des sols, et notamment la déforestation, ont entraîné une augmentation continue de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre (GES). Ces gaz se caractérisent par leur capacité à absorber puis à réémettre l'énergie rayonnée par la surface terrestre. Ils contribuent ainsi à réchauffer la surface terrestre et une partie de l'atmosphère.

Les activités humaines sont également responsables de l'émission d'autres composants chimiques, tels que les aérosols (petites particules liquides ou solides en suspension dans l'air) qui perturbent aussi le bilan radiatif de manière significative, mais cette fois à la baisse, en réduisant l'énergie solaire reçue à la surface.

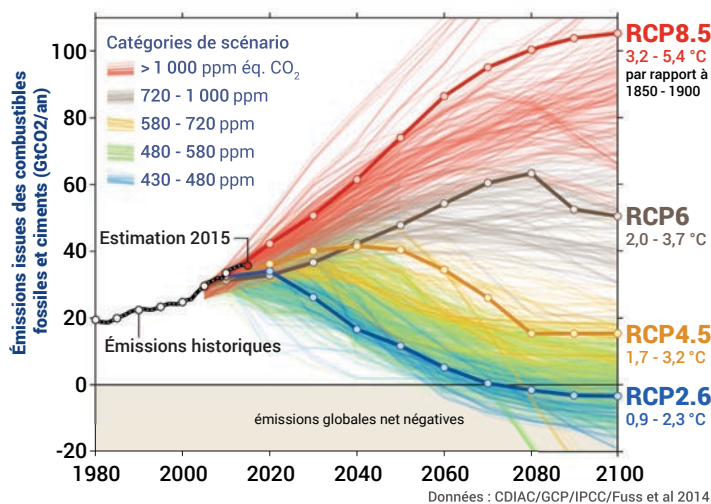


Figure 1 : Évolution des émissions entre 1980 et 2100, selon les différents scénarios disponibles. Les quatre scénarios sélectionnés dans le cadre du 5^e rapport du GIEC (RCP) sont mis en évidence. Source : Global Carbon Project.

LES SCÉNARIOS D'ÉMISSION DE GAZ À EFFET DE SERRE

Les modifications de la composition chimique de l'atmosphère et plus précisément la concentration des GES, sont la principale cause des changements climatiques observés et à venir. Modéliser le climat futur implique donc de faire des hypothèses sur l'évolution des émissions dites anthropiques de GES et d'aérosols au cours des prochaines décennies.

L'évolution de ces émissions anthropiques dépend d'un ensemble de facteurs tels que la croissance démographique, le développement socio-économique, les évolutions technologiques et les choix politiques futurs. Prédire avec précision l'évolution de ces facteurs n'est pas possible, c'est pourquoi les climatologues utilisent

une gamme de scénarios d'émissions de GES, dont chaque scénario correspond à une représentation plausible du comportement à venir des sociétés humaines.

Dans le cadre du cinquième rapport du GIEC (2013), quatre scénarios représentatifs ont été sélectionnés parmi plus de 1000 disponibles (*figure 1*). Baptisés RCP (pour Representative Concentration Pathways, ou Profils représentatifs d'évolution de concentration), ils fournissent une base commune aux différentes équipes d'experts (climatologues, hydrologues, agronomes, économistes...), qui travaillent sur ce sujet.

Les quatre RCP se répartissent entre deux

scénarios extrêmes (les RCP2.6 et RCP8.5) et deux scénarios intermédiaires (RCP4.5 et RCP6.0). Le RCP2.6 décrit un monde vertueux, très sobre en émissions de gaz à effet de serre, dans lequel le réchauffement global reste inférieur à 2°C par rapport aux températures préindustrielles. C'est le seul parmi les quatre scénarios qui respecterait l'accord international de Paris sur le changement climatique approuvé en Décembre 2015. Le RCP8.5 décrit quant à lui un futur excluant toute politique de régulation du climat, menant à environ 5°C de réchauffement global d'ici la fin du siècle. Les scénarios RCP4.5 et RCP6.0 décrivent des voies intermédiaires, dans lesquelles les émissions continuent de croître pendant quelques décennies, se stabilisent avant la fin du XXI^e siècle, puis décroissent à un rythme plus modéré que dans le RCP2.6.

Encart A

POURQUOI UTILISER DES SIMULATIONS CMIP5 PLUTÔT QUE CMIP6 ?

La 6^{ème} phase du projet CMIP (CMIP6, Eyring et al. 2016) a démarré en 2016. Ce nouvel ensemble de simulations sera utilisé dans le prochain rapport du GIEC (AR6), à l'automne 2021, conjointement avec l'ensemble CMIP5. A ce jour près de 60 simulations climatiques ont été produites et l'analyse des résultats issus des simulations est en cours par la communauté scientifique. Le projet CMIP6 confirme largement les résultats des précédentes phases CMIP quant à l'évolution de la température moyenne de la planète sur les périodes passée et future. En particulier, les modèles ne peuvent reproduire l'amplitude du réchauffement de la période passée sans prendre en compte l'évolution des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre et des aérosols due aux activités humaines. Les premiers résultats suggèrent cependant qu'un certain nombre de nouveaux modèles simulent un réchauffement plus important à l'horizon 2100 que les versions précédentes. Cela s'explique notamment par une réaction plus forte du climat à l'augmentation des gaz à effet de serre anthropique que dans les simulations CMIP5, mais les raisons de cette sensibilité accrue et le degré de confiance à y apporter restent à évaluer.

De plus, il n'existe pas encore d'ensemble de simulations régionales forcées par les simulations CMIP6, ni de correction statistique de ces simulations. Pour toutes ces raisons, l'utilisation des simulations CMIP6 dans le cadre des services climatiques semble aujourd'hui prématurée. Ces nouvelles simulations pourront cependant être utilisées dans les années à venir.

LES MODÈLES CLIMATIQUES

Ces scénarios d'émission sont utilisés en entrée de modèles climatiques globaux (Global Climate Model, GCM) dont l'objectif est de simuler l'évolution du climat à l'échelle mondiale. Pour un scénario d'émission donné, le climat simulé diffère d'un modèle à l'autre - ce qui reflète notre compréhension imparfaite du système climatique. Pour tenir compte de l'incertitude liée aux modèles et mieux représenter la gamme des futurs possibles, il est donc nécessaire de considérer de larges ensembles de projections climatiques.

Le nouveau jeu DRIAS s'appuie sur l'ensemble global produit dans le cadre de l'exercice international CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, 5^e phase) qui a servi de base au 5^e rapport du GIEC (IPCC, 2014 : Climate Change 2014 : Synthesis Report). On distingue la période dite historique des simulations, entre 1850

et 2005, et la partie projection qui s'étend de 2006 à 2100 et au-delà.

A noter que les nouvelles simulations CMIP6, en cours de production, n'ont pas été prises en compte (*voir encart A*).

La résolution des modèles globaux, de l'ordre de 150 à 200 km, est insuffisante pour représenter correctement les phénomènes météorologiques locaux, ainsi que certains événements extrêmes. Plusieurs méthodes existent pour élaborer un diagnostic à plus fine échelle, parmi lesquelles la descente d'échelle dynamique¹.

La descente d'échelle dynamique consiste à utiliser des modèles de climat régionaux (Regional Climate Models - RCM). Ces modèles sont très semblables aux modèles globaux dans leur construction, mais ils représentent le système climatique plus finement sur une sous-partie du globe (exemple : l'Europe, voir l'encart B).

La coopération internationale entre les centres de modélisation régionale du climat s'inscrit dans le cadre du programme CORDEX qui vise entre autres à produire des ensembles de simulations climatiques régionales pour tous les continents, pilotées par les modèles GCM de l'exercice CMIP5, pour différents scénarios et avec un cadre commun.

Dans le cadre du volet européen, Euro-CORDEX (Jacob et al., 2014, 2020), plus d'une centaine de projections (triplet RCP/GCM/RCM) sont actuellement disponibles à 12 km de résolution sur un domaine qui couvre la France métropolitaine, Corse incluse. La période historique des simulations s'étale a minima de 1971 à 2005 tandis que les projections s'étendent de 2006 à 2100.

Dans le cadre d'Euro-CORDEX, seuls les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 ont été utilisés pour produire des simulations régionales.

Le nouveau jeu DRIAS qui vise à produire des scénarios à haute résolution sur la France s'appuie sur les simulations climatiques régionalisées (*voir encart B*) produites dans le cadre Euro-Cordex (*en savoir plus sur les simulations régionalisées Euro-CORDEX*). Trois scénarios RCP sont ainsi disponibles : RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5.

1) <https://www.climat-en-questions.fr/reponse/evolution-future/regionalisation-par-samuel-somot-robert-vautard>

Encart B

POURQUOI UTILISER DES SIMULATIONS CLIMATIQUES RÉGIONALES ?

À l'échelle globale, échelle de modélisation des modèles de type GCM, il est difficile de prendre en compte les phénomènes météorologiques locaux, comme ceux qui se produisent en montagne ou sur une île dont la taille est inférieure à celle de la maille. Le relief des terres émergées n'est pas très détaillé : les Pyrénées ne dépassent pas 1000 m ; le Massif central et les Alpes ne forment par exemple qu'un seul bloc, ce qui masque le sillon rhodanien et les phénomènes météorologiques qui s'y produisent, comme le mistral (voir figure B1). Or, des diagnostics fins sur l'évolution future de ce type de phénomènes sont indispensables aux acteurs socio-économiques pour mener des études d'impact du changement climatique, dans des domaines comme l'hydrologie ou la production agricole. Le dernier inconvénient des modèles globaux est leur faible capacité à simuler les événements extrêmes (vents violents, précipitations intenses) qui sont souvent liés à des phénomènes de petite échelle.

Pour affiner le diagnostic issu des modèles globaux, les climatologues produisent des simulations régionalisées, à l'aide de modèles de climat régionaux (RCM pour Regional Climate Models). Ces derniers ne couvrent qu'une partie du globe, l'Europe par exemple, et sont forcés aux bords par les modèles globaux. Ils offrent une haute résolution spatiale (de 10 à 20 km) qui permet une meilleure représentation du climat local (reliefs, contrastes terre-mer, traits de côte complexes) (voir figure B1 relief et trait de côte).

Relief et trait de côte pour la France

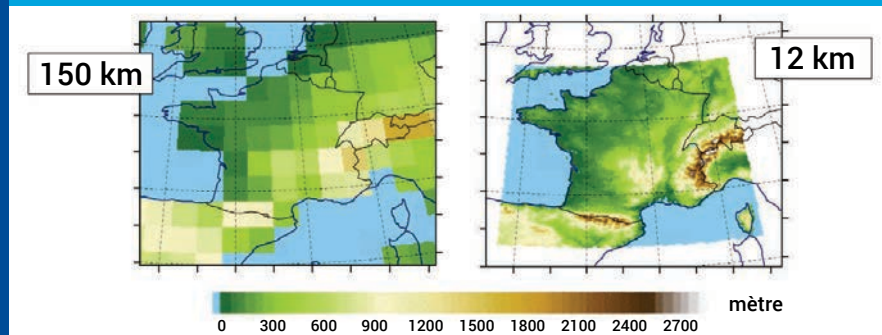


Figure B1 : Illustration de la différence de résolution entre la modélisation climatique globale (150 km de résolution) et la modélisation climatique régionale (12 km) sur le relief et le trait de côte de la France (C. Cassou, Cerfacs). L'échelle de couleur représente l'altitude des mailles des modèles (en mètres).

1.2 LA SÉLECTION DES SIMULATIONS POUR LE JEU DRIAS-2020

LES CRITÈRES DE SÉLECTION

Pour appréhender correctement les différentes sources d'incertitude des projections climatiques (voir Encart C), il est indispensable de s'appuyer sur un ensemble large de projections climatiques. Cependant, l'ampleur du travail de préparation des données et les contraintes techniques de leur mise à disposition dans le cadre de services climatiques nécessite d'optimiser la taille de cet ensemble, ce qui facilite en retour les traitements des utilisateurs.

Le nouveau jeu DRIAS a donc nécessité de sélectionner de manière experte, à partir de l'ensemble Euro-CORDEX, un sous-ensemble de simulations, permettant de couvrir le mieux possible la gamme des

changements futurs de température et précipitations issue de l'ensemble total sur la France. Dans la suite du rapport, cette gamme des changements simulés sera appelée dispersion.

Huit critères de sélection ont ainsi été définis :

- la sélection de 12 couples GCM / RCM,
- la disponibilité des simulations pour au moins deux scénarios d'émissions,
- la prise en compte des GCM jugés les plus réalistes sur l'Europe pour forcer des RCM,
- la prise en compte d'une diversité de RCM,
- le rejet des couples GCM/RCM présentant une erreur connue,
- la sélection préférentielle des RCM issus des centres français de modélisation climatique (ALADIN et WRF),
- l'optimisation de la dispersion du changement climatique simulé sur la France par les couples sélectionnés,
- la sélection préférentielle des couples avec une cohérence dans la physique entre les modèles GCM et RCM.

Il est à noter que les simulations Euro-CORDEX basées sur ces 12 couples GCM/RCM ne sont pas toutes disponibles pour les 3 scénarios RCP.

Au final, le jeu DRIAS-2020 compte ainsi 30 simulations du climat futur (12 projections RCP8.5, 10 projections RCP4.5 et 8 projections RCP2.6) s'appuyant sur 12 simulations historiques.

GCM	RCM	HISTO	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
CNRM-CM5	Aladin63 V2	■	■	■	■
CNRM-CM5	RACMO22E v2	■	■	■	■
IPSL-CM5A-MR	WRF381P	■		■	■
IPSL-CM5A-MR	RCA4	■		■	■
HadGEM2-ES	RegCM4-6	■	■		■
HadGEM2-ES	CCLM4-8-17	■		■	■
EC-EARTH	RACMO22E v2	■	■	■	■
EC-EARTH	RCA4	■	■	■	■
MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17	■	■	■	■
MPI-ESM-LR	REMO*	■	■	■	■
NorESM1-M	HIRHAM5 v3	■		■	■
NorESM1-M	REMO**	■	■		■

* REMO 2009 ; ** REMO 2015

Tableau 1 : Les 30 simulations du climat futur et 12 simulations historiques du jeu DRIAS-2020 basées sur les 12 couples GCM/RCM sélectionnés.

Encart C

QUEL EST L'IMPACT DU CHOIX DE LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE ?

Pour analyser les effets du changement climatique, on parle rarement des valeurs absolues attendues sur une région ou un pays mais plutôt de l'écart avec les valeurs observées sur une période passée ou récente. Cette période est longue d'au moins 30 ans, comme pour le calcul des normales climatologiques. Selon les applications et leur finalité, plusieurs références peuvent cohabiter et l'attention du lecteur est attirée sur ce point, pouvant être source de mauvaise compréhension.

Pour ce présent rapport, la période de référence est 1976-2005, à ne pas confondre avec la référence utilisée pour estimer le réchauffement global planétaire dans les accords internationaux.

Référence pré-industrielle (1850-1900)

Dans le cadre de l'accord international de Paris sur le changement climatique, les pays ont convenu de réduire les émissions de gaz à effet de serre afin de limiter l'augmentation de la température moyenne mondiale en dessous de 2°C, et si possible 1,5°C par rapport aux niveaux préindustriels. Le choix d'une période représentative de ce climat pré-industriel, c'est-à-dire « pas encore significativement influencé par l'homme » fait débat (e.g. Schurer et al., 2017), mais la période 1850-1900 est souvent utilisée. Il s'agit de la période la plus ancienne pour laquelle on dispose d'observations fiables et raisonnablement nombreuses de température à l'échelle mondiale, et l'influence humaine demeurait limitée à cette période.

Référence climat actuel (1976-2005)

Pour ce rapport, la période de référence utilisée est 1976 à 2005. Il s'agit d'une période standard de 30 ans du passé récent qui correspond à la période de 30 ans la plus récente possible dans les simulations historiques Euro-Cordex ainsi qu'à la référence actuelle utilisée dans le portail DRIAS. Attention, certains jeux de données ou indicateurs accessibles sur le portail DRIAS ou d'autres applications peuvent utiliser d'autres références, plus anciennes (1961-1990) ou plus récentes (1981-2010).

Sensibilité du diagnostic de réchauffement climatique à la référence utilisée

Le choix de la période de référence peut modifier la valeur des changements attendus pour différentes variables climatiques, la température notamment. Cette sensibilité est illustrée ci-dessous à partir de l'indicateur thermique France depuis 1900 (figure C1).

Ainsi avec la référence 1976-2005, le réchauffement par rapport au début du XX^e siècle en France (normale 1901-1930) est de +0,8°C, mais la moyenne des températures observées sur la période récente 2011-2019 est supérieure de +1°C à cette référence 1976-2005.

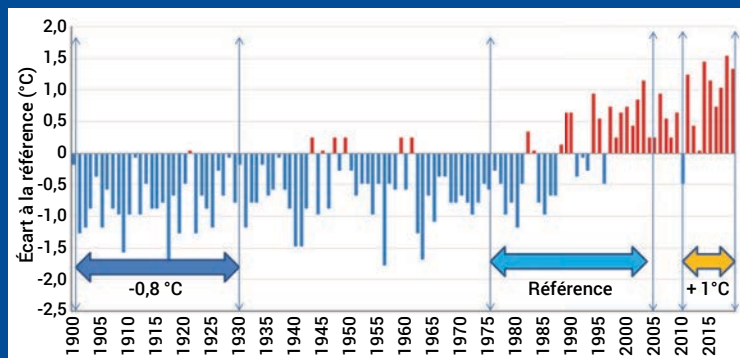


Figure C1 : Evolution de l'anomalie de température moyenne annuelle en France de 1900 à 2019 par rapport à la période de référence 1976-2005. La décennie actuelle (2011-2019) est plus chaude (+1°C) que la période de référence 1976-2005, elle-même déjà réchauffée (+0,8°C) par rapport au début du XX^e siècle (période 1901-1930).

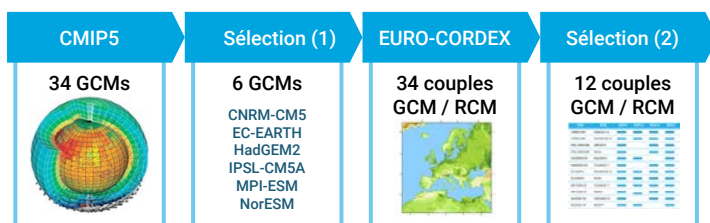


Figure 2 : Synthèse des étapes de la sélection des simulations pour le jeu DRIAS-2020. L'ensemble CMIP5 est ici caractérisé par 34 GCM. Les « forceurs » sont les 6 GCM CMIP5 qui ont été utilisés pour forcer des simulations régionales Euro-CORDEX jugés réalistes sur l'Europe. Les 34 couples Euro-CORDEX correspondent aux simulations régionales forcées par ces 6 GCM forceurs, disponibles en 2020. Parmi eux, 12 sont sélectionnés pour former l'ensemble DRIAS, selon les critères explicités.

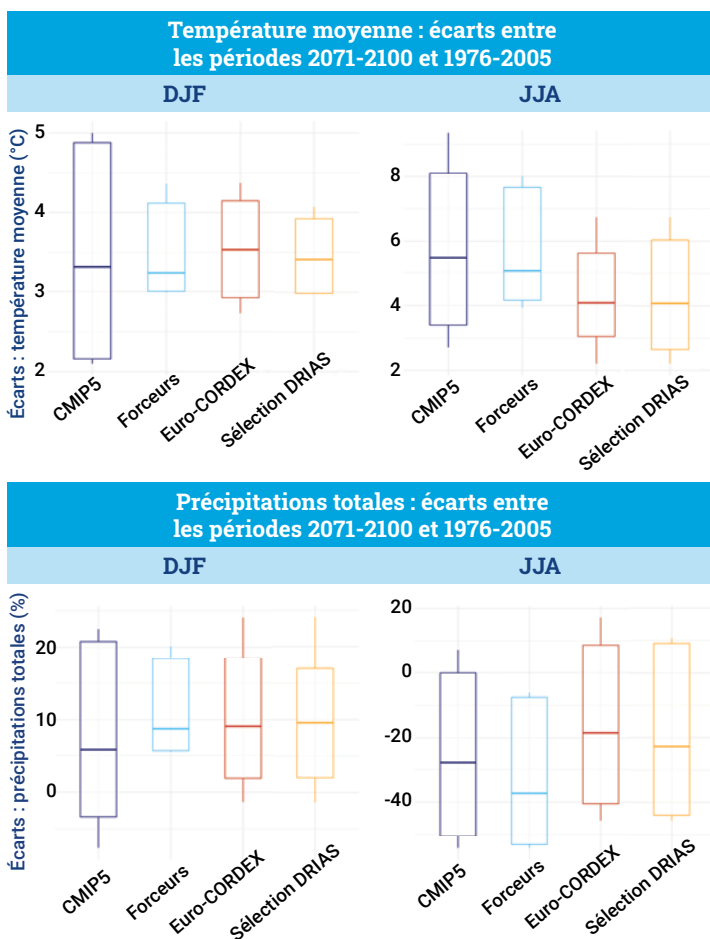


Figure 3 : Comparaison de la dispersion des simulations RCP8.5 (minimum et maximum, centiles 10, 50 et 90) issues de 4 sources de données différentes (Tous GCM de CMIP5, GCM forceurs d'Euro Cordex, ensemble Euro-Cordex, sélection DRIAS), pour 2 paramètres (température et précipitations) et 2 saisons (hiver et été).

IMPACT DE LA SÉLECTION DRIAS-2020 SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE SIMULÉ

A chaque étape, de la sélection des simulations, depuis l'ensemble des simulations globales CMIP5 existantes jusqu'aux simulations régionales Euro-CORDEX sélectionnées, la dispersion des changements climatiques simulés est susceptible d'être modifiée. Par exemple, la gamme de valeurs du réchauffement simulé par les modèles, depuis le moins sensible (celui projetant le plus faible réchauffement) jusqu'au plus sensible, n'est pas constante.

On observe une bonne cohérence entre le jeu DRIAS et l'ensemble Euro-CORDEX pour les deux paramètres et saisons étudiés (voir figure 3), à un degré moindre pour les précipitations d'été, légèrement plus faibles dans le jeu DRIAS. En revanche, il est noté des évolutions différentes entre les ensembles fondés sur des simulations régionales (Euro-CORDEX) et les simulations globales (CMIP5), notamment en matière de températures estivales (Euro-CORDEX moins chaud) ou de précipitations hivernales (Euro-CORDEX plus humide). Ces différences, observées sur d'autres zones que la France ont été analysées dans plusieurs études (Sorland et al., 2018 ; Schwingshackl et al., 2019 ; Boé et al., 2020), sans conclusion claire à ce jour sur la meilleure qualité respective des modèles globaux ou régionaux.

1.3 LA CORRECTION STATISTIQUE DES SIMULATIONS

LA MÉTHODE ADAMONT

De manière générale, les projections climatiques ne peuvent être utilisées directement pour les études d'impact à l'échelle locale car elles présentent des biais par rapport aux observations. La mise en oeuvre d'une méthode de correction statistique des simulations climatiques est indispensable pour pouvoir comparer les résultats des projections avec le climat actuel ou passé et pour pouvoir calculer un grand nombre d'indicateurs climatiques basés notamment sur des seuils absolus.

La première étape de mise en oeuvre nécessite de définir un jeu d'observations et une période de référence pour le climat actuel : nous utilisons ici la réanalyse SAFRAN sur la période de 30 ans 1976-2005. Cette période est importante

à identifier car l'évolution prévue des paramètres climatiques sera exprimée en comparaison à cette référence. (voir encart C : impact de la période de référence).

Il convient ensuite de définir une méthode statistique : ici la méthode ADAMONT (voir fiche 3). Celle-ci permet de corriger la distribution simulée de chaque variable pour la rendre cohérente avec la distribution observée, en utilisant une climatologie par saison et régimes de temps. C'est une méthode qui a été récemment mise au point pour les besoins des études d'impact.

La figure 4 illustre l'enchaînement des étapes de la descente d'échelle dynamique et du débiaisage statistique.

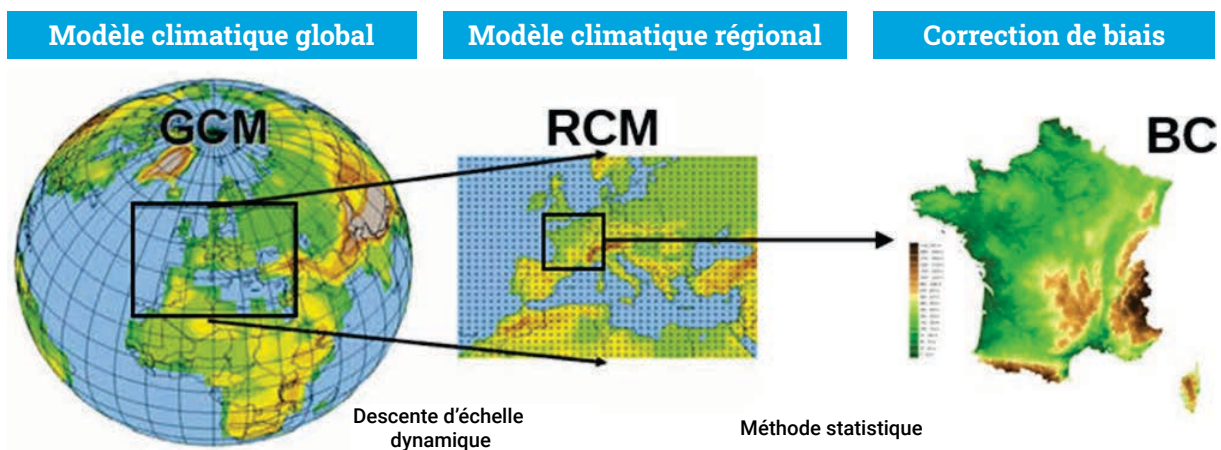


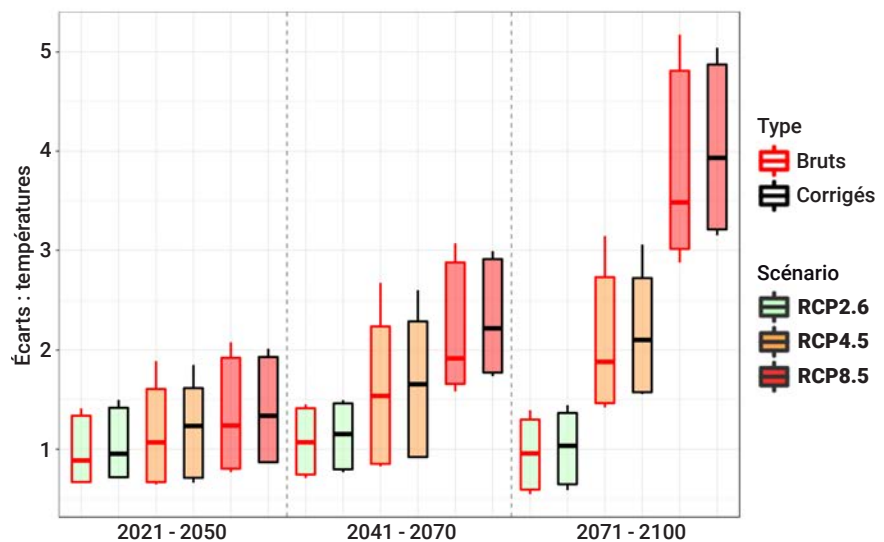
Figure 4 : Les étapes de descente d'échelle (dynamique et statistique) depuis la modélisation globale à régionale jusqu'à la correction de biais.

IMPACT DE LA CORRECTION ADAMONT SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE SIMULÉ

La méthode ADAMONT corrige les simulations brutes de notre sélection (12 simulations GCM/RCM) pour chaque variable (température, précipitation ...) en fonction des biais saisonniers observés. La *figure 5* ci-dessous montre l'impact de cette correction sur les variables température moyenne et cumul de

précipitations à l'échelle de l'année. Sur la médiane de la distribution, la correction ADAMONT occasionne des écarts de l'ordre de quelques dixièmes de °C pour les températures et de quelques pourcents pour les précipitations, à la hausse ou à la baisse selon les simulations. Des écarts plus importants sont notés sur les bornes supérieures de la distribution pour les précipitations. Les différences relatives entre les simulations (plus ou moins chaudes, plus ou moins humides) sont globalement conservées.

Température moyenne : écarts des moyennes sur 30 ans



Précipitations totales : écarts des moyennes sur 30 ans

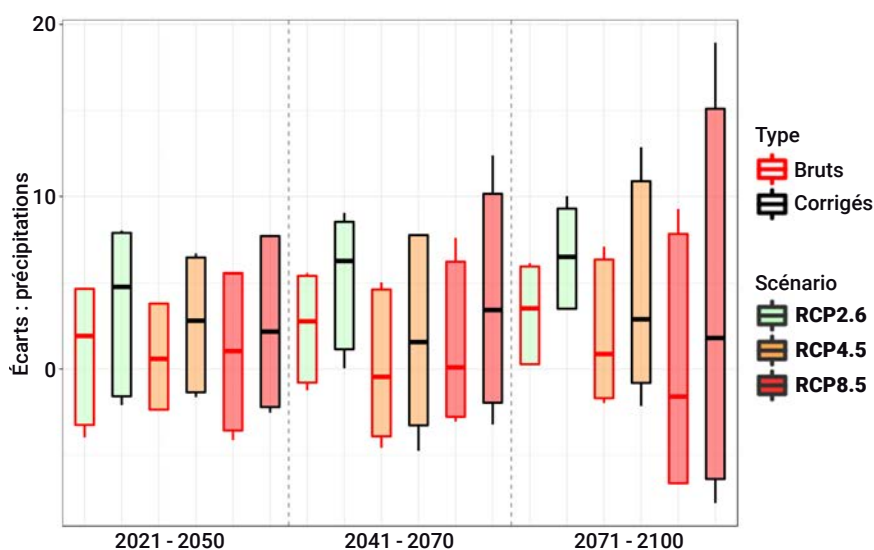


Figure 5 : Évolution temporelle (par période de 30 ans) écarts de températures (en haut) et des précipitations (à droite) en France pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 pour les 12 simulations utilisées par DRIAS, avant (cadre rouge) et après (cadre noir) la correction ADAMONT.

1.4 SYNTHÈSE DE LA CONSTITUTION DU JEU DRIAS-2020

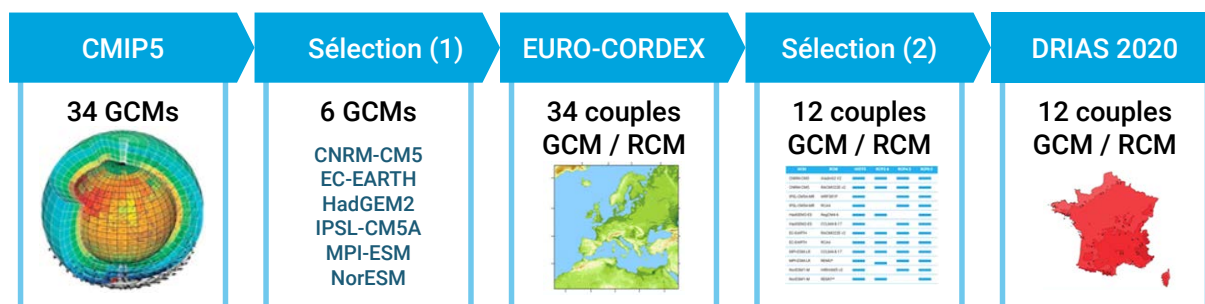
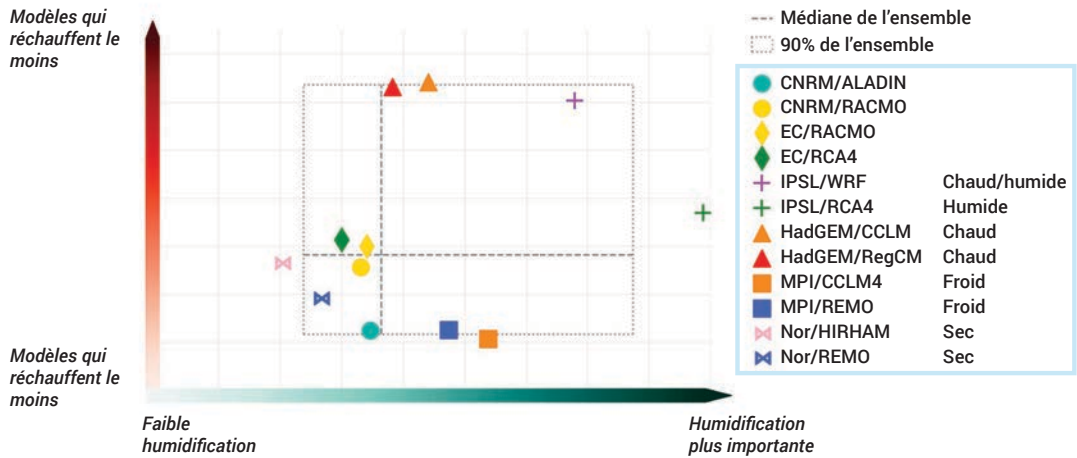


Figure 6 : Synthèse de l'ensemble des étapes de la sélection des simulations pour le jeu DRIAS-2020. Les 12 couples GCM/RCM sélectionnées à partir de l'ensemble Euro-Cordex ont été corrigées par la méthode statistique ADAMONT

Pour caractériser l'ensemble DRIAS-2020 de manière synthétique, on peut comparer entre elles les simulations en fonction de l'évolution de température et de précipitation qu'elles prévoient à l'échelle de la France pour différents scénarios RCP, horizons temporels et saisons. La figure 7 est un exemple de représentation pour le RCP8.5, l'horizon fin de siècle et les saisons hiver et été.

Un autre élément de confiance est de regarder comment ces simulations climatiques dont la partie « projection » débute en 2006 se sont comportées sur la période récente 2006-2019 (voir encart D).

Écarts hiver 2071 - 2100 - RCP8.5



Écarts été 2071 - 2100 - RCP8.5

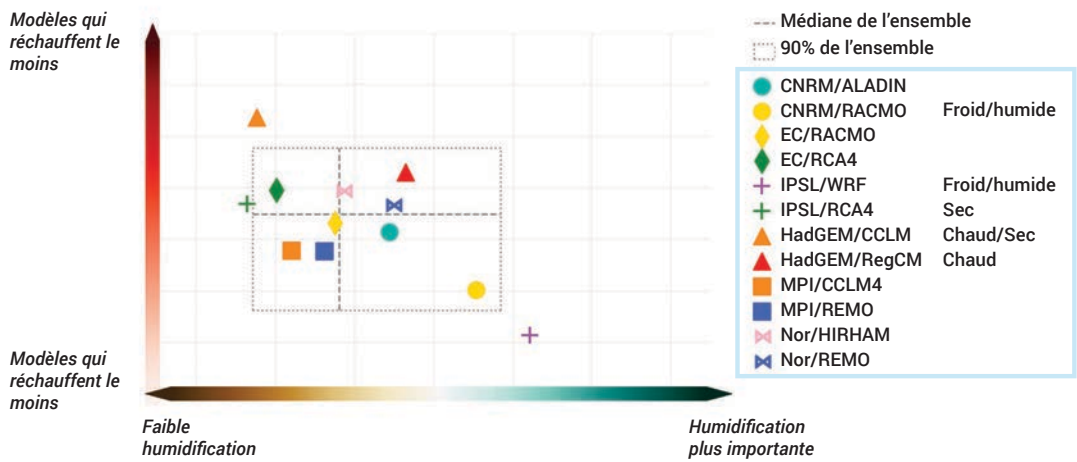


Figure 7 : Dispersion des simulations individuelles de l'ensemble DRIAS-2020 selon les évolutions prévues de précipitation (abscisses) et température (ordonnées) pour un scénario RCP8.5 à l'horizon fin de siècle et deux saisons : hiver en haut, été en bas.

Encart D

COMMENT SE COMPORTE LE JEU DRIAS-2020 SUR LA PÉRIODE 2006-2019 ?

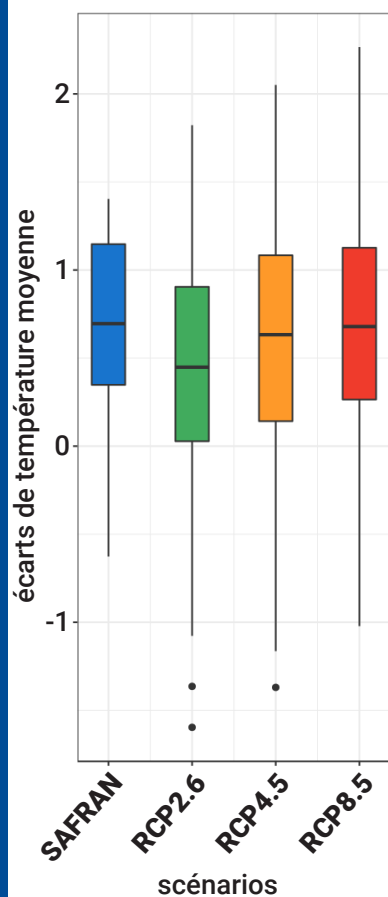
Les projections climatiques utilisées dans le jeu DRIAS-2020 débutent en 2006 et il est important de vérifier leur comportement sur les 14 dernières années (jusqu'en 2019) pour évaluer leur performance.

La figure D1 compare la distribution de l'observation issue du jeu SAFRAN avec celle calculée à partir des 3 ensembles RCP de notre jeu DRIAS-2020 pour la température moyenne annuelle de la période 2006-2019.

Les trois ensembles RCP s'avèrent proches de la distribution des observations de SAFRAN. Le meilleur résultat est obtenu par l'ensemble RCP8.5, devant le RCP4.5 puis le RCP2.6. Ce bon comportement sur les 14 premières années de simulation est rassurant mais il n'est cependant pas une garantie de performance pour le climat futur.

Figure D1 : Comparaison sur la période 2006-2019 de la distribution des observations SAFRAN de température moyenne annuelle avec celles de nos trois ensembles RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5. Chaque boxplot représente la valeur minimale, les quantiles 25, 50 et 75 et la valeur maximale du jeu de données considéré.

Température moyenne : écarts entre les périodes 2006-2019 et 1976-2005



1.5 LES INDICATEURS CLIMATIQUES

Le nouveau jeu DRIAS-2020 est composé de deux lots de données distincts :

1. les variables climatiques de surface (à 2 m de la surface du sol) à fréquence quotidienne : température et humidité de l'air, précipitations solides et liquides, vitesse du vent,

2. les indicateurs climatiques calculés à partir des données quotidiennes, sur des fréquences temporelles mensuelles, saisonnières, annuelles et jusqu'à des périodes de 30 années représentatives des différents climats.

3. La liste complète des indicateurs disponibles sur DRIAS se trouve sur la *fiche 4*, ainsi que des explications sur le calcul de ces indicateurs qui peut parfois relever de traitements complexes.

Voir *encart E « Pourquoi a-t-on besoin d'indicateurs pour analyser le changement climatique ? »*

Nous explicitons ci-dessous les indicateurs utilisés dans le chapitre 2 « Diagnostic » de ce rapport.

Encart E

POURQUOI A-T-ON BESOIN D'INDICATEURS POUR ANALYSER LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

L'analyse du changement climatique concerne les principales variables atmosphériques telles que la température, les précipitations ou le vent, à la fois dans leur comportement moyen mais également pour leurs valeurs extrêmes.

Un indicateur est défini pour être représentatif d'une des caractéristiques du climat, par exemple :

- température moyenne
- précipitations extrêmes
- cumul annuel de précipitations
- nombre de nuits tropicales (Tmin ≥ 20°)
- nombre de jours de gel
- nombre de jours de vent fort en hiver

Certains sont représentatifs du climat moyen (température moyenne, cumul annuel de précipitations, ...) et d'autres sont représentatifs des comportements extrêmes (nombre de jours de fortes chaleurs, nombre de jours de gel, ...).

Lorsque l'on s'intéresse au changement climatique et que l'on veut donc évaluer ce qui 'change' on utilise souvent des indicateurs qui représentent des écarts par rapport à une référence connue.

C'est pourquoi par la suite on utilise souvent des indicateurs de ce type :

- écart de la température moyenne annuelle par rapport à la référence (1976-2005 dans notre cas, voir *encart C : Impact de la référence temporelle*)
- écart relatif par rapport à la référence (1976-2005) du cumul annuel de précipitation
- Par ailleurs, étudier le climat et non le temps qu'il fait au quotidien, signifie que l'on s'intéresse à un temps moyen établi sur des périodes temporelles assez longues qui peuvent aller du mois à plusieurs années. De même on pourra s'intéresser au climat de la France métropolitaine dans sa globalité ou bien au climat de régions particulières.

Des traitements d'agrégation temporelle et spatiale sont aussi réalisés sur les indicateurs pour obtenir d'un côté des données par horizon de 30 ans en chaque point de grille et de l'autre des synthèses sur la France entière.

Le calcul des indicateurs est plus ou moins complexe et nécessite en général plusieurs étapes d'agrégation notamment, mais aussi parfois de calcul des paramètres statistiques d'une distribution.

INDICATEURS SUR LES TEMPÉRATURES

Indicateurs	Définitions	Unité
Température moyenne	Moyenne de la température quotidienne moyenne	°C
Nombre de jours de vague de chaleur	Période anormalement chaude durant plus de 5 jours consécutifs. On détermine les jours pour lesquels la température maximale quotidienne dépasse de plus de 5°C une valeur climatologique de référence, mais en ne sommant que les jours appartenant à une série de plus de cinq jours chauds consécutifs. La valeur de référence de chaque jour de l'année est la moyenne glissante sur cinq jours du cycle annuel moyen de la température maximale quotidienne simulée pour la période 1976-2005.	Nbr jours
Nombre de jours de forte chaleur	Nombre de jours où la température maximale quotidienne dépasse 35°C	Nbr jours
Nombre de nuits tropicales	Nombre de nuits avec des températures minimales quotidiennes supérieures à 20°C.	Nbr jours
Nombre de jours de vague de froid	Période anormalement froide durant plus de 5 jours consécutifs. On détermine les jours pour lesquels la température minimale quotidienne est inférieure de plus de 5°C une valeur climatologique de référence, mais en ne sommant que les jours appartenant à une série de plus de cinq jours froids consécutifs. La valeur de référence de chaque jour de l'année est la moyenne glissante sur cinq jours du cycle annuel moyen de la température minimale quotidienne simulée pour la période 1976-2005.	Nbr jours
Nombre de jours de gel	Nombre de jours où la température minimale est inférieure à 0°C	Nbr jours

INDICATEURS SUR LES PRÉCIPITATIONS

Indicateurs	Définitions	Unité
Cumul des précipitations	Somme des précipitations liquides et solides.	mm
Précipitations extrêmes	Valeur du 99 ^e centile des cumuls quotidiens de précipitations.	mm
Nombre de jours de précipitations extrêmes	Nombre de jours où les précipitations quotidiennes dépassent le 99 ^e centile des précipitations totales de la période de référence	Nbr jours
Nombre max de jours secs consécutifs	L'indice calculé ici, permettant de caractériser l'intensité des sécheresses du point de vue météorologique, est le nombre maximum de jours secs consécutifs. Un jour est considéré sec si les précipitations quotidiennes lui correspondant n'ont pas excède 1 mm.	Nbr jours

INDICATEURS SUR LE VENT

Indicateurs	Définitions	Unité
Vent fort	L'intensité des vents fort est caractérisée par la valeur du 98 ^e centile des vitesses de vent. Par exemple, le 98 ^e centile annuel est calculé en classant pour chaque année les 365 (ou 366) données de vitesses de vent dans l'ordre croissant, le 98 ^e centile est alors la valeur au-dessus de laquelle se trouvent les 2 % des valeurs les plus élevées (soit la 357 ^e valeur / 365).	m/s

DES INDICATEURS « STATISTIQUES » EN SUPPORT À L'ÉVALUATION DE L'INCERTITUDE

Les indicateurs DRIAS sont calculés pour chacune des simulations (couple GCM/RCM) retenues pour le jeu DRIAS-2020 (ensemble de 12 GCM/RCM) et pour chaque scénario d'émission (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) ainsi que la période historique.

Ainsi chaque indicateur est disponible pour un ensemble allant de 8 à 12 membres.

Les sources d'incertitude sont liées à la variabilité interne, aux modèles climatiques, et à celles sur les scénarios d'émission (Hawkins et Sutton, 2011). C'est pourquoi nous utilisons l'ensemble de modèles (couple GCM/RCM) disponible pour chaque scénario RCP et des moyennes sur 30 ans pour représenter la dispersion des signaux climatiques modélisés. Nous accédons ainsi à une évaluation de l'incertitude associée aux simulations du climat futur.

(voir encart F « Quelles sont les sources d'incertitude des projections climatiques ? »)

Des outils statistiques simples permettent de quantifier et de décrire cette dispersion ; le plus courant d'entre eux est le centile.

Le jeu de données DRIAS propose, au sein des produits de distribution plusieurs centiles : 5, 17, 25, 50 (médiane), 75, 83, 95.

■ Le 5^e centile (C5) est la valeur seuil pour laquelle 95 % des valeurs de la distribution sont plus élevées (la probabilité de dépasser le 5^e centile est de 95 %).

■ La médiane (C50) est la valeur seuil pour laquelle 50 % des valeurs de la distribution sont plus élevées (la probabilité de dépasser la médiane est de 50 %).

■ Le 95^e centile (C95) est la valeur seuil pour laquelle 5 % des valeurs de la distribution sont plus élevées (la probabilité de dépasser le 95^e centile est de 5 %)

La plage s'étendant du centile 5 % au centile 95 % est utilisée pour quantifier l'incertitude associée à chacune de variables étudiées dans ce rapport. Notons que cette plage contient 90 % des valeurs de la distribution.

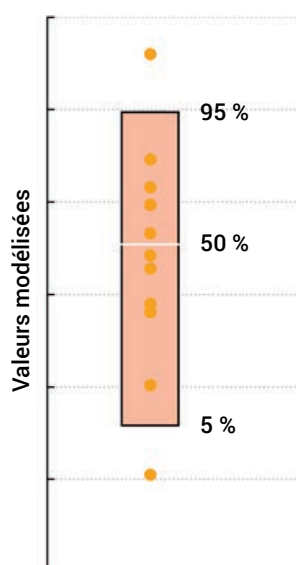


Figure 8 : Représentation de l'incertitude montrant les valeurs des simulations individuelles (points), la valeur médiane multi-modèle (ligne en gras) et la plage de centiles estimée à 90 % (barre colorée). La plage de 90 % est calculée de telle sorte que ses limites supérieure et inférieure correspondent aux deuxièmes valeurs les plus élevées et aux deuxièmes valeurs les plus basses pour un ensemble de 12 membres.

Encart F

QUELLES SONT LES SOURCES D'INCERTITUDE DES PROJECTIONS CLIMATIQUES ?

Différentes sources d'incertitude doivent être prises en compte pour comprendre et modéliser les futurs changements climatiques¹. Leur part relative évolue selon les paramètres et les périodes temporelles considérées.

■ **La variabilité naturelle intrinsèque du système climatique** : La variabilité naturelle est liée aux interactions des différentes composantes du système climatique entre elles. Elle peut masquer temporairement les effets de l'évolution du climat aux horizons temporels proches.

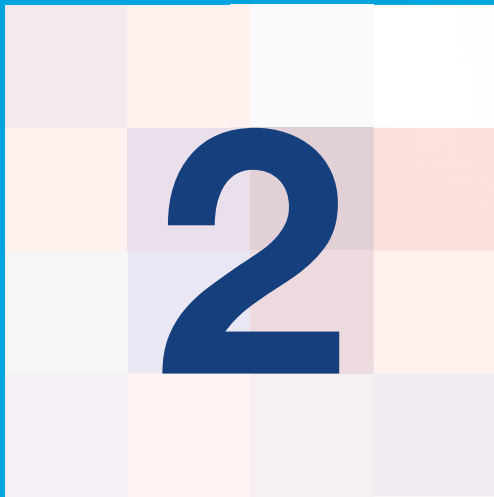
■ **L'incertitude des modèles climatiques** : Plusieurs modèles (on parle ici de couple GCM / RCM) numériques peuvent fournir avec les mêmes hypothèses de départ des estimations différentes de l'évolution du climat. En effet, la formulation et la paramétrisation des processus physiques et thermodynamiques peuvent être très différentes selon les modèles ainsi que leur résolution spatiale (horizontale ou verticale). Le niveau d'incertitude liée aux modèles climatiques est beaucoup plus important pour les précipitations que pour les températures

■ **Les incertitudes du scénario socio-économique** : Une part importante d'incertitude repose sur le fait que nous ne savons pas quelles seront les concentrations de gaz à effet de serre et des aérosols dans le futur. Elles sont traitées au travers de scénarios climatiques délivrant une image d'un climat futur possible. Ces scénarios sont basés sur des descriptions de l'évolution des émissions de GES selon différentes hypothèses traduites en scénarios de concentrations : les RCP, nommés selon des plages de valeurs possibles du forçage radiatif en 2100. Ces scénarios sont prescrits en données d'entrée aux modèles de climat.

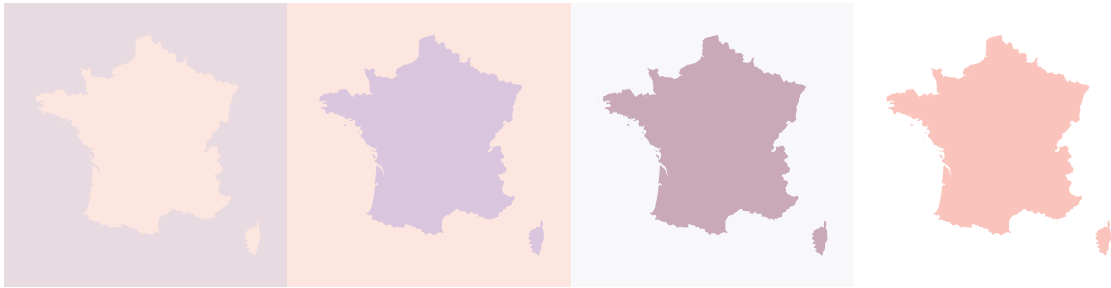
Le niveau d'incertitude lié au scénario socio économique augmente généralement avec les échéances temporelles.

■ **Les incertitudes associées à la méthode de correction** : Les modèles climatiques utilisés pour simuler le climat futur contiennent des erreurs systématiques (biais) que l'on corrige avec des outils statistiques, comme la méthode ADAMONT utilisée dans le jeu DRIAS-2020. Cette correction elle-même n'est pas parfaite et peut influencer sur la valeur attendue du changement climatique notamment sur les extrêmes de température ou de précipitation, plus difficiles à évaluer.

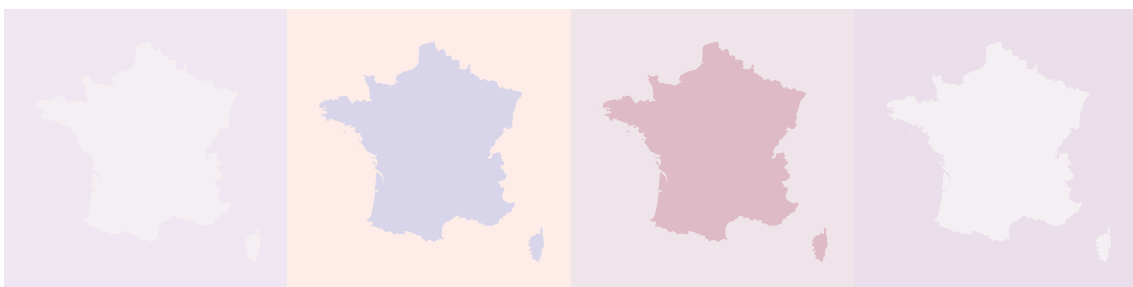
¹ <https://vimeo.com/85531294>



LE DIAGNOSTIC DU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN MÉTROPOLE



Cette partie vise à caractériser – à partir du jeu DRIAS-2020 - les effets du changement climatique en France métropolitaine en examinant l'évolution des principales variables climatiques (température, précipitation ou force du vent) à la fois dans leur comportement moyen mais également pour leurs valeurs extrêmes (canicule, précipitations intenses, ...).



2.1 LA PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

LA REPRÉSENTATION DES INCERTITUDES

Les résultats présentés concernent les évolutions climatiques attendues ET les incertitudes associées :

Les incertitudes socio-économiques sont abordées en comparant les résultats obtenus pour les trois scénarios d'émission (RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5).

■ Les incertitudes liées aux modèles climatiques utilisés sont reflétées par l'utilisation des produits de distribution (centiles).

■ Pour représenter les produits de distribution, on utilisera plusieurs modes de représentation.

Le panache

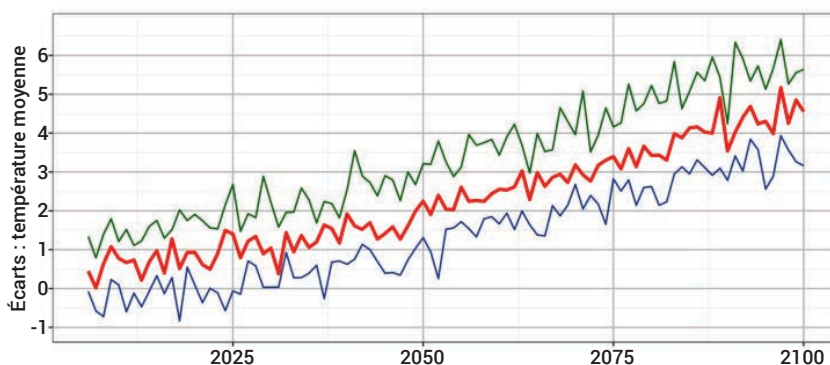
Le panache est utilisé pour représenter l'évolution temporelle d'une variable, souvent agrégée sur une zone géographique (par exemple la température estivale sur la France).

On représente année par année la médiane de l'ensemble. Un lissage (moyenne glissante sur 20 ans) est appliqué afin de mettre en évidence l'évolution à long terme de la variable considérée, et représentée en trait plein.

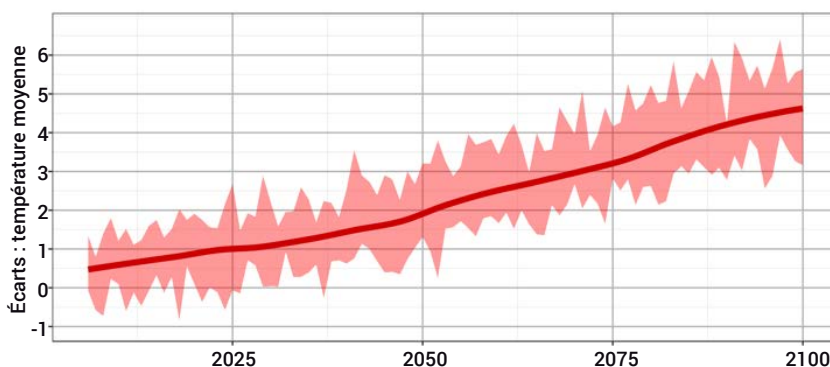
La médiane pouvant cacher de larges différences entre les modèles, elle est superposée à une enveloppe allant du 5^e au 95^e centile, qui illustre la dispersion de l'ensemble au fil du temps.

Figure 9 : Illustration du principe du panache. En haut : évolution temporelle de l'anomalie de température moyenne sur la France pour le scénario RCP8.5 : centile 5 en bleu, médiane en rouge et centile 95 en vert. En bas : représentation sous forme d'un panache. Une moyenne glissante sur 20 ans a été appliquée à la courbe rouge (médiane) et la zone comprise entre le C5 et le C95 est représentée en rose.

Température moyenne : écarts des moyennes annuelles du RCP8.5



Température moyenne : écarts des moyennes annuelles du RCP8.5



La boxplot

La boxplot (*figure 8 du chapitre 1*) permet de représenter de manière synthétique la dispersion de l'ensemble pour une variable agrégée sur une zone géographique et en moyenne sur une période temporelle (exemple : la température estivale sur la France pour l'horizon lointain, moyenne sur la période 2071-2100).

L'exemple ci-contre (*figure 10*) compare à l'aide de boxplots la température estivale sur la France pour le scénario RCP8.5 pour 3 horizons temporels différents (proche, moyen, lointain). La boxplot s'étend ici des centiles 5 et 95 avec un trait intérieur signalant la valeur médiane de la distribution.

La représentation cartographique.

Pour étudier la variabilité de l'évolution en fonction des zones géographiques, on peut cartographier les valeurs des produits de distribution. On associe donc généralement 3 cartes : centile 5, médiane, et centile 95 (*figure 11*).

Les cartes centile 5 et centile 95 complète l'information donnée par la carte centrale (médiane). Elles indiquent respectivement la valeur dépassée par 95 % des membres et la valeur que seuls 5 % des membres dépassent.

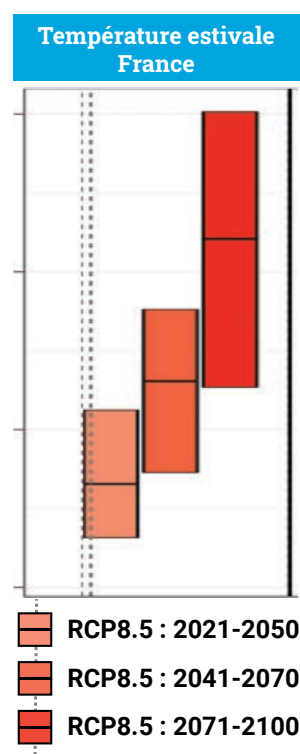


Figure 10



Figure 11 : Exemple de représentation cartographique avec pour la même échéance temporelle et le même scénario, le centile 5 de l'ensemble à gauche, la médiane au centre et le centile 95 à droite.

LA DÉMARCHE

Les résultats s'appuient sur des indicateurs climatiques DRIAS (voir fiche) calculés sur trois scénarios d'émission de gaz à effet de serre (RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5), pour trois horizons temporels (H1=2021-2050, H2=2041-2070 et H3=2071-2100), pour trois centiles particuliers de la distribution de l'ensemble de modèles régionaux (centile 5, centile 50 ou médiane et centile 95) et potentiellement plusieurs périodes (année, saisons particulières : hiver ou été notamment).

Une démarche commune est adoptée pour l'analyse de ces indicateurs :

- Introduction éventuelle avec la présentation générale de l'évolution attendue de l'indicateur au cours du siècle pour les 3 scénarios sous forme de graphe,
- Analyse temporelle : comparaison de l'évolution de l'indicateur aux 3 horizons temporels et pour les 3 percentiles sous forme de cartes selon le RCP8.5,
- Analyse de l'impact des scénarios : en fin de siècle (horizon 2071-2100) comparaison de l'évolution de l'indicateur pour les 3 RCPs et les 3 percentiles sous forme de cartes,
- Évolution saisonnière éventuelle (si pertinent),
- Synthèse du diagnostic.

Pour étudier l'évolution des températures en France métropolitaine nous utilisons l'indicateur « température moyenne quotidienne¹ ». Les écarts de cet indicateur, par rapport à la période 1976-2005, sont examinés dans différentes déclinaisons :

- écarts des moyennes annuelles agrégés sur la France métropolitaine : *figure 12*
- écarts des moyennes annuelles sur 30 ans (par horizon) : *figures 13 et 14*
- écarts des moyennes saisonnières sur 30 ans, agrégés sur la France métropolitaine : *figure 15*

ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE ANNUELLE

La *figure 12* montre le réchauffement attendu en France à l'échelle annuelle au cours du XXI^e siècle et pour les trois scénarios RCP. Le réchauffement est assez semblable pour les différents scénarios sur l'horizon proche (jusqu'en 2040) puis il varie nettement selon le RCP considéré. Sur l'horizon fin de siècle, on attend un réchauffement de l'ordre de +1°C en RCP2.6, +2,2°C en RCP4.5 et de l'ordre de +4,5°C en RCP8.5.

En scénario RCP8.5 (*figure 13*) on constate que le réchauffement attendu est relativement uniforme d'un point de vue spatial en métropole (du moins à l'horizon

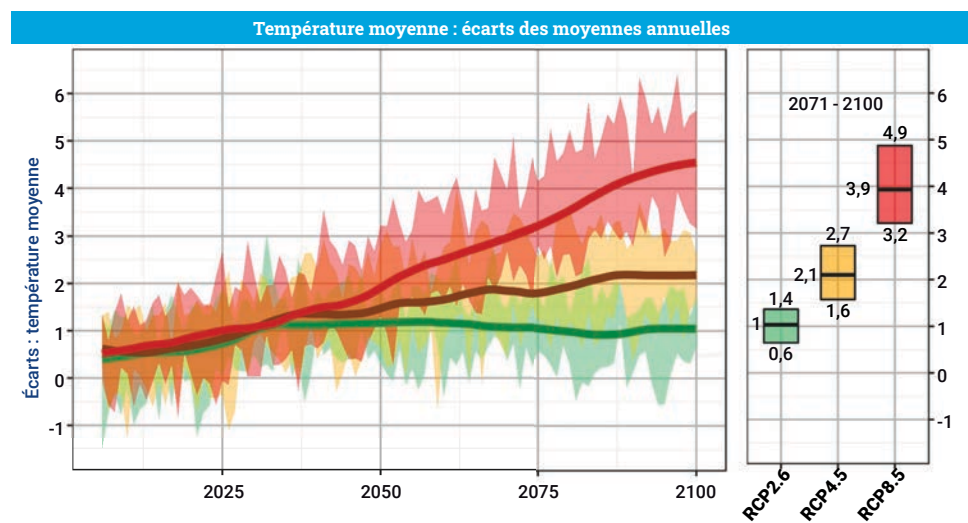


Figure 12 : Évolution de l'écart de température moyenne annuelle au cours du XXI^e siècle (par rapport à la référence 1976-2005) pour les trois scénarios RCP2.6 en vert, RCP4.5 en orange et RCP8.5 en rouge. Le trait continu correspond à la médiane lissée (moyenne glissante sur 20 ans). L'enveloppe de couleur illustre l'intervalle entre les centiles 5 et 95 de la distribution de l'ensemble des simulations. La boxplot de droite représente les écarts de température sur le dernier horizon temporel (2071-2100).

¹ La température moyenne quotidienne est définie par : $T_m = (T_n + T_x)/2$, où T_n et T_x correspondent respectivement aux températures minimale et maximale quotidiennes.

proche) et s'accroît de façon considérable entre le début de période (H1) et la fin de la période (H3). On relève un réchauffement plus marqué sur les zones de montagne, et un gradient sud-est / nord-ouest, avec un réchauffement légèrement moindre de la Bretagne aux Hauts de France.

On note une différence d'environ 1°C entre

les simulations les plus fraîches (centile 5) et les simulations les plus chaudes (centile 95) avec des structures spatiales semblables.

Une autre manière d'interpréter l'incertitude consiste à examiner à quelle échéance temporelle chacune des simulations atteint un même niveau de réchauffement donné.

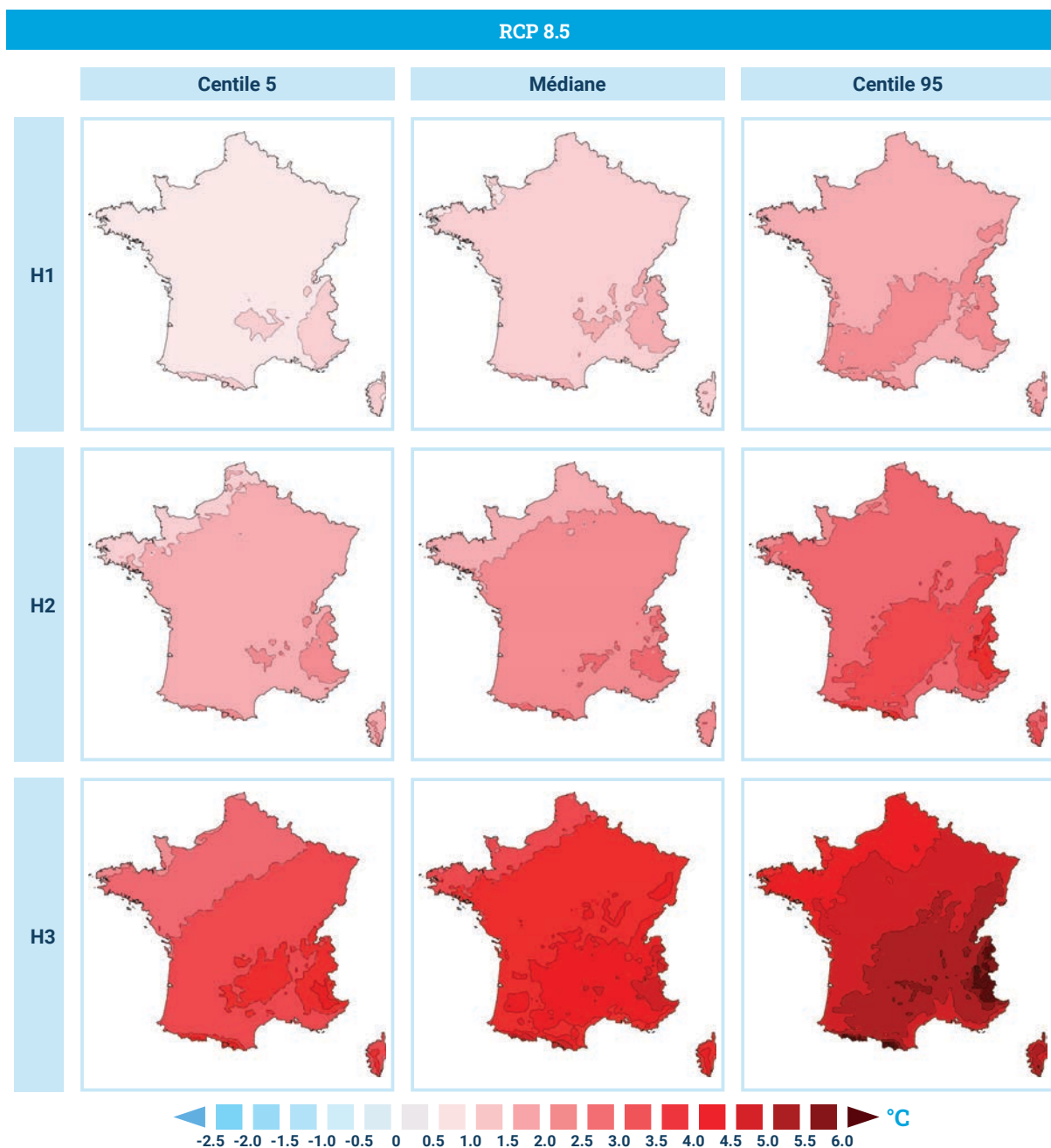


Figure 13 : Cartes des écarts de température pour le scénario RCP8.5 par horizon temporel et selon les paramètres de la distribution C5, C50 et C95.

On note ainsi un décalage d'environ 30 ans entre les simulations les plus fraîches et les plus chaudes, respectivement. Par exemple, sous les hypothèses du RCP8.5, toutes les simulations indiquent que le réchauffement sera supérieur à 3°C, dès les années 2070 selon les simulations les plus chaudes, et plutôt en fin de XXI^e siècle selon les plus fraîches.

En fin de siècle (*figure 14*), la comparaison des simulations issues des trois RCP met en évidence un réchauffement présent en évidence un réchauffement présent pour tous les RCP, d'intensité croissante du RCP2.6 au RCP4.5 et RCP8.5. Les structures spatiales du réchauffement sont identiques dans les trois RCP avec un gradient Nord Ouest-Sud Est.

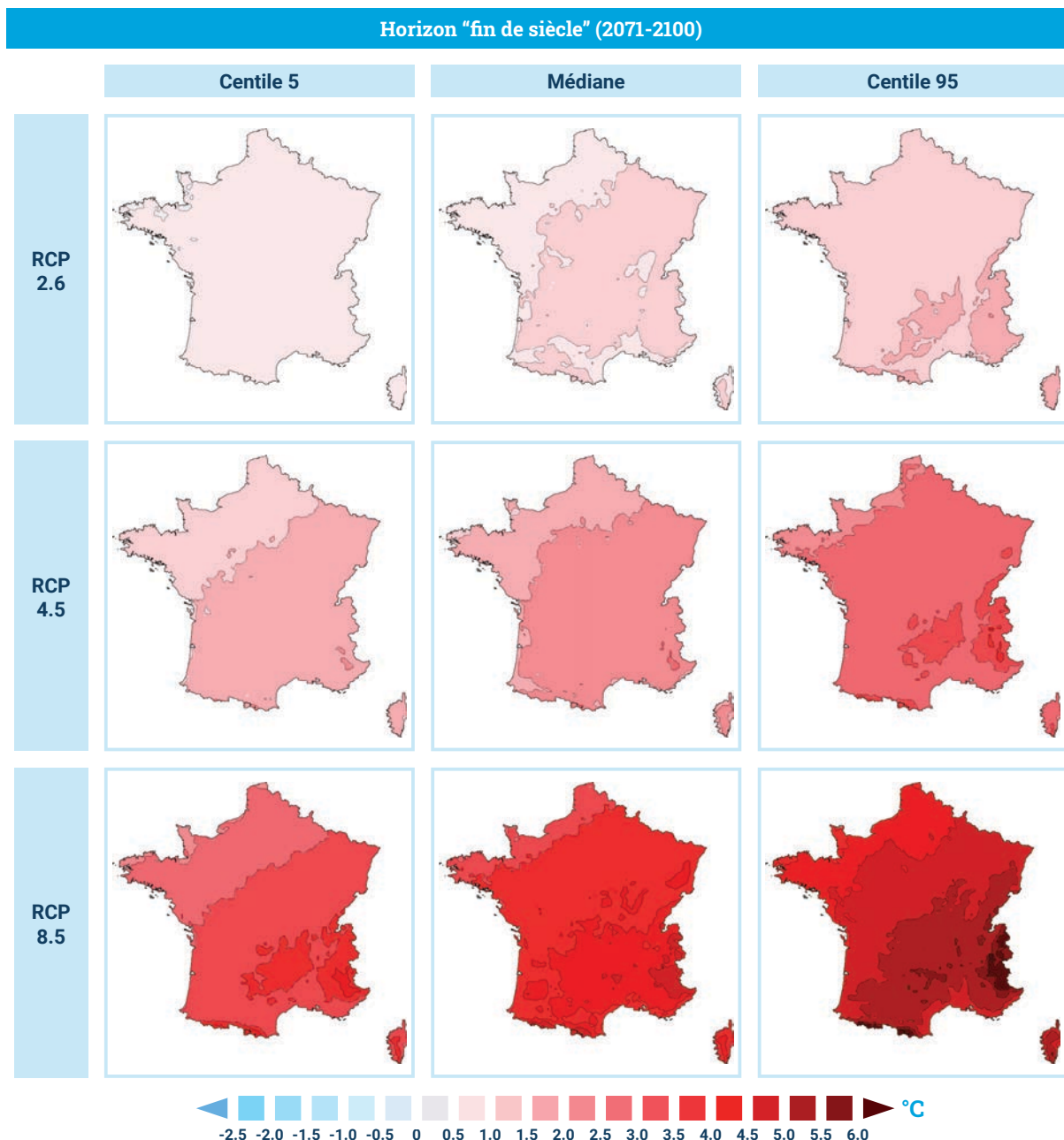


Figure 14 : Cartes des écarts de température à l'horizon fin de siècle pour les trois RCP et selon les paramètres de la distribution C5, C50 et C95

ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES MOYENNES SAISONNIÈRES

L'évolution saisonnière des écarts de températures par horizon temporel pour les trois RCP (*figure 15*) est marquée avec un réchauffement plus sévère en été et moindre au printemps. Cette dynamique saisonnière existe à tous les horizons temporels.

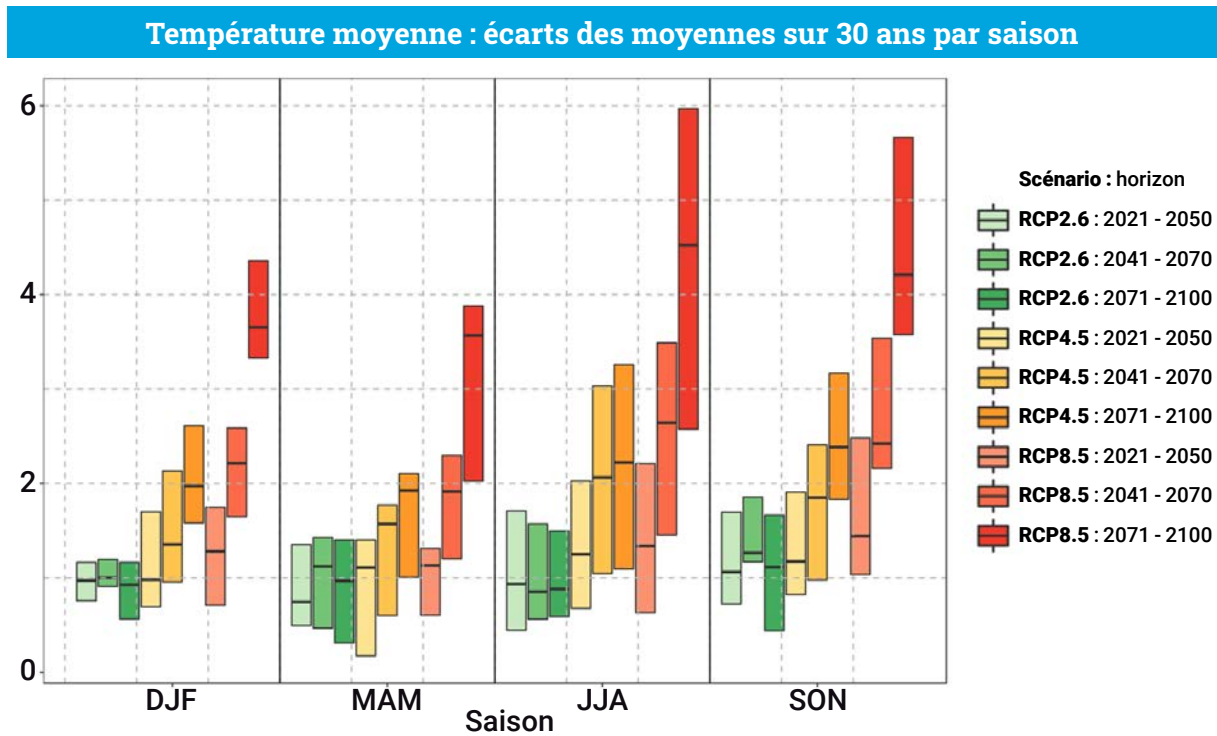


Figure 15 : Graphique de l'évolution saisonnière des écarts de températures par RCP et horizon temporel.

SYNTHÈSE POUR LES ÉCARTS DE TEMPÉRATURE MOYENNE

Les trois tableaux ci-dessous présentent les enveloppes (centile 5, médiane et centile 95) des écarts de température moyenne attendus par horizon temporel et par RCP pour l'année, l'hiver et l'été.

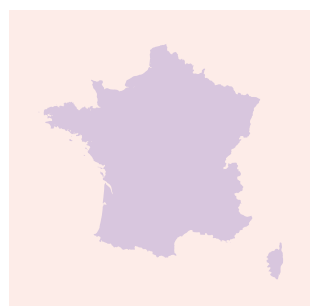
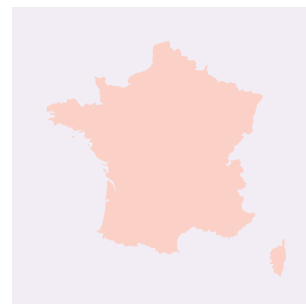
Année	RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5	
	Médiane	[C5 ; C95]	Médiane	[C5 ; C95]	Médiane	[C5 ; C95]
H1	+1,0°C	[+0,7°C ; +1,4°C]	+1,2°C	[+0,7°C ; +1,6°C]	+1,3°C	[+0,9°C ; +1,9°C]
H2	+1,2°C	[+0,8°C ; +1,5°C]	+1,7°C	[+0,9°C ; +2,3°C]	+2,2°C	[+1,8°C ; +2,9°C]
H3	+1,0°C	[+0,6°C ; +1,4°C]	+2,1°C	[+1,6°C ; +2,7°C]	+3,9°C	[+3,2°C ; +4,9°C]

Hiver	RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5	
	Médiane	[C5 ; C95]	Médiane	[C5 ; C95]	Médiane	[C5 ; C95]
H1	+0,9°C	[+0,7°C ; +1,2°C]	+1,0°C	[+0,7°C ; +1,7°C]	+1,3°C	[+0,7°C ; +1,7°C]
H2	+1,0°C	[+0,9°C ; +1,2°C]	+1,4°C	[+1,0°C ; +2,1°C]	+2,2°C	[+1,6°C ; +2,6°C]
H3	+0,9°C	[+0,6°C ; +1,2°C]	+2,0°C	[+1,6°C ; +2,6°C]	+3,7°C	[+3,3°C ; +4,4°C]

Été	RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5	
	Médiane	[C5 ; C95]	Médiane	[C5 ; C95]	Médiane	[C5 ; C95]
H1	+1,1°C	[+0,5°C ; +1,7°C]	+1,3°C	[+0,7°C ; +2,0°C]	+1,3°C	[+0,6°C ; +2,2°C]
H2	+1,0°C	[+0,6°C ; +1,6°C]	+2,1°C	[+1,0°C ; +3,0°C]	+2,6°C	[+1,5°C ; +3,5°C]
H3	+1,0°C	[+0,6°C ; +1,5°C]	+2,2°C	[+1,1°C ; +3,3°C]	+4,5°C	[+2,5°C ; +6,0°C]

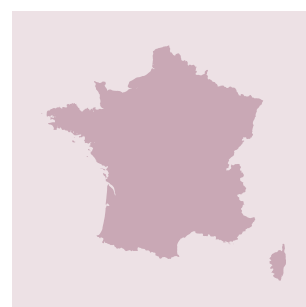
RÉSUMÉ POUR L'ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES

- ▶ La température moyenne est en hausse pour les trois scénarios. Le réchauffement est continu jusqu'en fin de siècle pour le RCP4.5 et RCP8.5, avec des valeurs médianes atteignant respectivement +2,1°C et +3.9°C, et jusqu'à +2,7°C et +4,9°C dans l'enveloppe haute de la distribution.



- ▶ La hausse de température est plus forte l'été dans les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 avec respectivement +2,2°C et +4,5°C en valeur médiane et jusqu'à +3,3°C et +6°C dans l'enveloppe haute de la distribution.

- ▶ Le réchauffement présente un gradient sud-est/nord-ouest sur la métropole avec une différence de 1°C entre ces deux zones. Le réchauffement est également plus marqué en montagne : Alpes et Pyrénées notamment.



Pour étudier l'évolution des précipitations en France métropolitaine nous utilisons l'indicateur « cumul des précipitations ». Les écarts relatifs de cet indicateur, par rapport à la période 1976-2005, sont examinés dans différentes déclinaisons :

- écarts relatifs cumulés sur une année et agrégés sur la France métropolitaine : *figure 16*
- écarts relatifs cumulés sur une année puis moyennés sur 30 ans (par horizon) : *figure 17 et 18*
- écarts relatifs cumulés par saison, moyennés sur 30 ans et agrégés sur la France métropolitaine : *figure 19*

ÉVOLUTION DU CUMUL ANNUEL DE PRÉCIPITATIONS

La *figure 15* ci-dessous montre l'évolution de l'écart relatif du cumul annuel de précipitation (par rapport à la référence 1976-2005) pour les trois scénarios RCP au cours du XXI^e siècle, marquée par peu de variation au cours du siècle et une forte incertitude se renforçant avec les scénarios, du RCP2.6 au RCP8.5 (+/- 25 %). On observe également une légère tendance à la hausse, notamment avec le RCP2.6 de l'ordre de 5 % sur la médiane des simulations.

En scénario RCP8.5, on constate que la variabilité spatiale de l'évolution du cumul de précipitation est peu marquée à tous les horizons même si un contraste nord-sud apparaît sur l'horizon fin de siècle avec une légère baisse sur la moitié sud accentuée aux abords des Pyrénées et une légère hausse sur la moitié nord, notamment vers les frontières Nord Est.

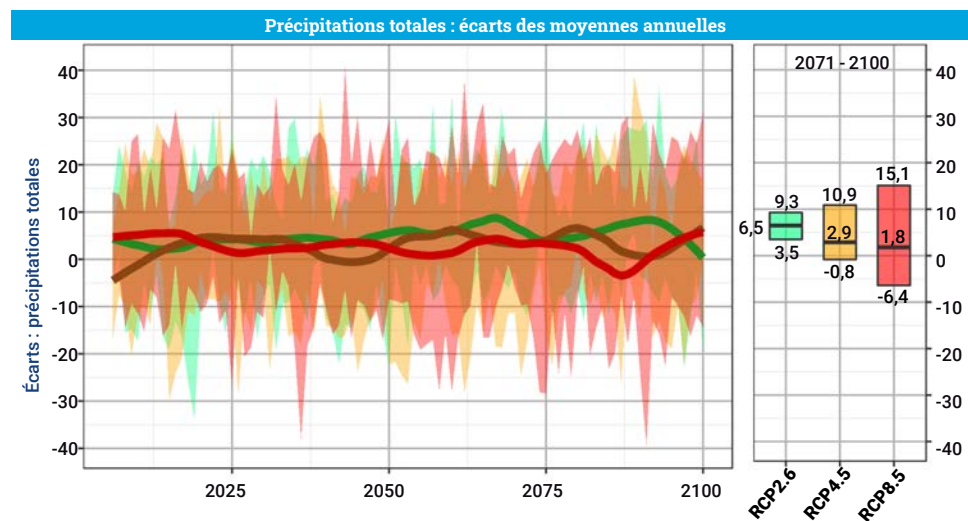


Figure 16 : Évolution de l'écart relatif du cumul annuel de précipitation au cours du XXI^e siècle (par rapport à la référence 1976-2005) pour les trois scénarios RCP2.6 en vert, RCP4.5 en orange et RCP8.5 en rouge. Le trait continu correspond à la médiane lissée. L'enveloppe de couleur illustre l'intervalle entre les centiles 5 et 95 de la distribution de l'ensemble des simulations. La boxplot de droite représente les écarts sur le dernier horizon 2071-2100.

On constate par contre une différence importante de signe (baisse ou hausse du cumul) selon les paramètres de la distribution (centiles 5 et 95) témoignant de l'incertitude liée aux modèles.

En fin de siècle (figure 18), la comparaison des simulations issues des trois RCP permet de mettre en évidence

des évolutions faibles mais avec des caractéristiques régionales différentes d'un scénario à l'autre :

- hausse faible et relativement uniforme en RCP2.6, légèrement plus marquée sur le Sud Est
- hausse faible également en RCP4.5 à l'exception de l'extrême sud (régions

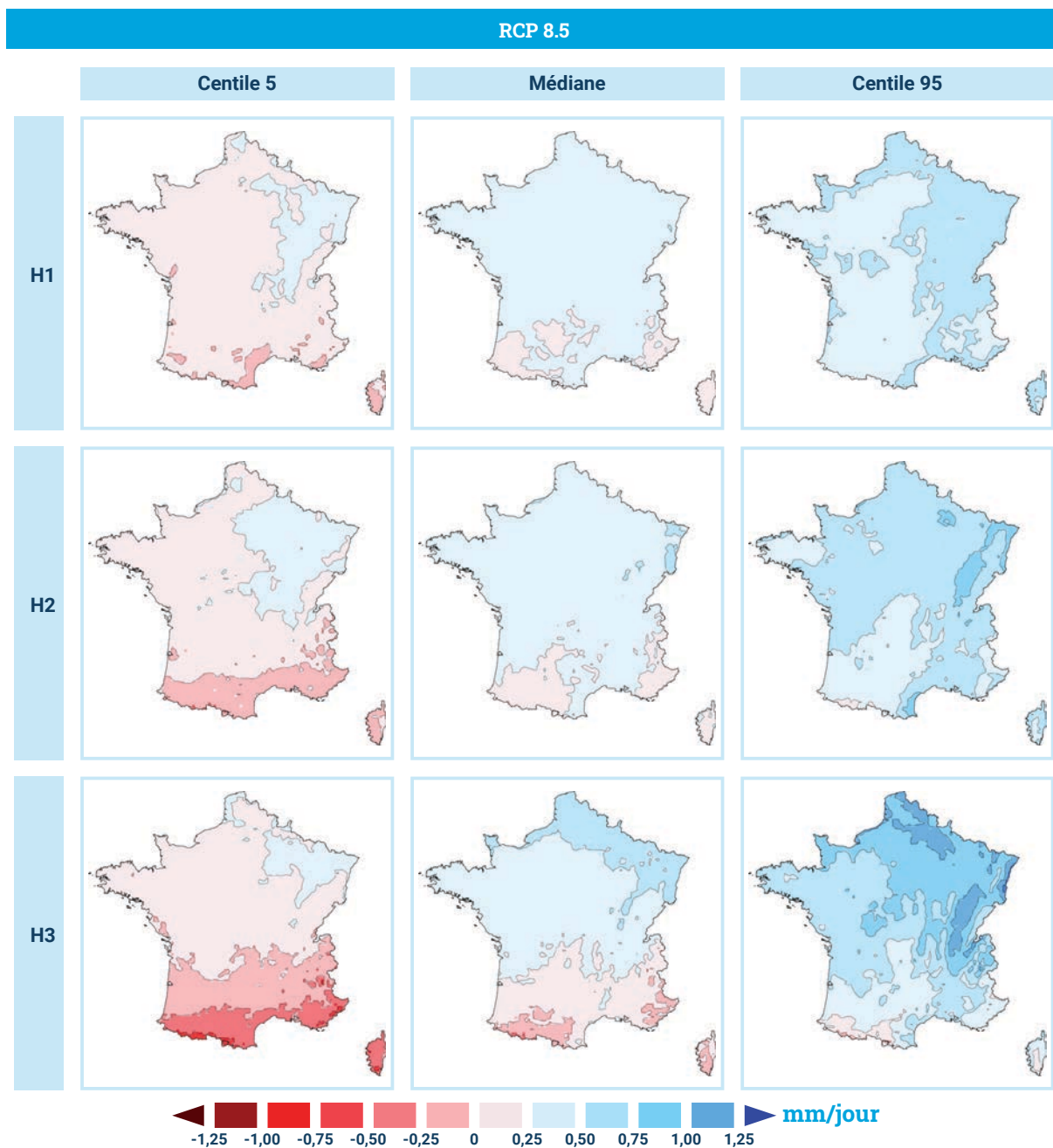


Figure 17 : Cartes des écarts de cumul annuel de précipitation pour le RCP8.5 par horizon temporel et selon les paramètres de la distribution C5, C50 et C95.

Pyrénéennes) et une hausse plus marquée sur l'est du pays

- signal nord sud plus contrasté avec le RCP8.5 avec une baisse dans la moitié sud (notamment aux abords du relief des Pyrénées et des Alpes) et une hausse dans la moitié nord, notamment près des frontières du Nord Est.

Même en fin de siècle, et dans les trois scénarios, on continue de constater des différences de signe (baisse ou hausse du cumul) selon les paramètres de la distribution (centiles 5 et 95) témoignant de l'incertitude liée aux modèles.

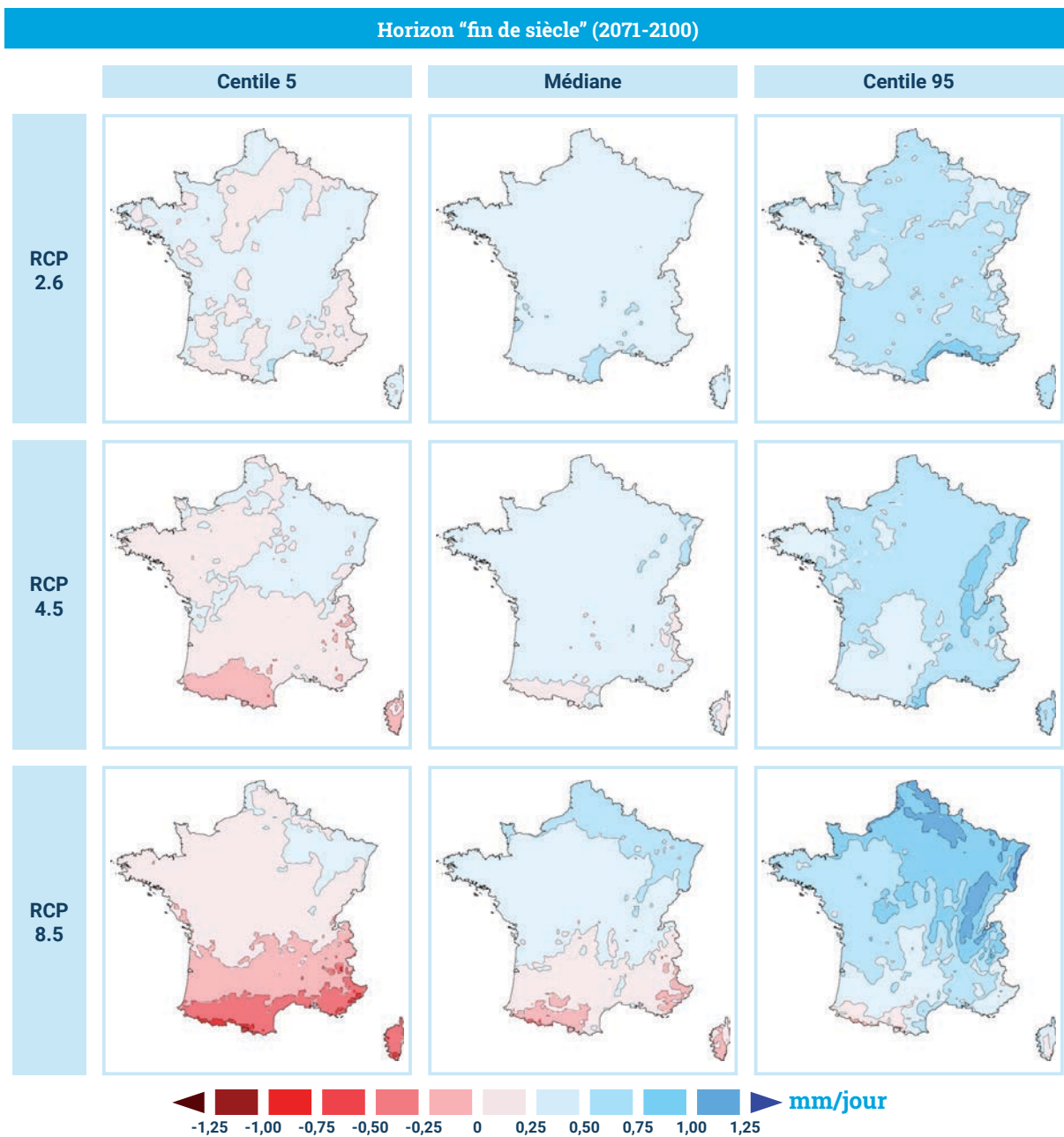


Figure 18 : Cartes des écarts de cumul annuel de précipitation à l'horizon fin de siècle pour les trois RCP et selon les paramètres de la distribution C5, C50 et C95.

ÉVOLUTION DES CUMULS DE PRÉCIPITATIONS SAISONNIERS

L'évolution saisonnière de l'écart relatif du cumul de précipitation par horizon temporel pour les trois RCP (figure 18) est très contrastée avec une prédominance de hausse en hiver et de baisse en été (à l'exception du RCP2.6) tandis que les

cumuls évoluent peu aux intersaisons.

Ces évolutions sont plus marquées avec le RCP8.5 en fin de siècle tant pour la hausse du cumul des précipitations hivernales que pour la diminution du cumul des précipitations estivales.

Ce scénario présente aussi l'incertitude la plus forte en été allant de +15 % à -45 % selon les simulations.

Précipitations totales : écarts relatifs des moyennes corrigées sur 30 ans par saison

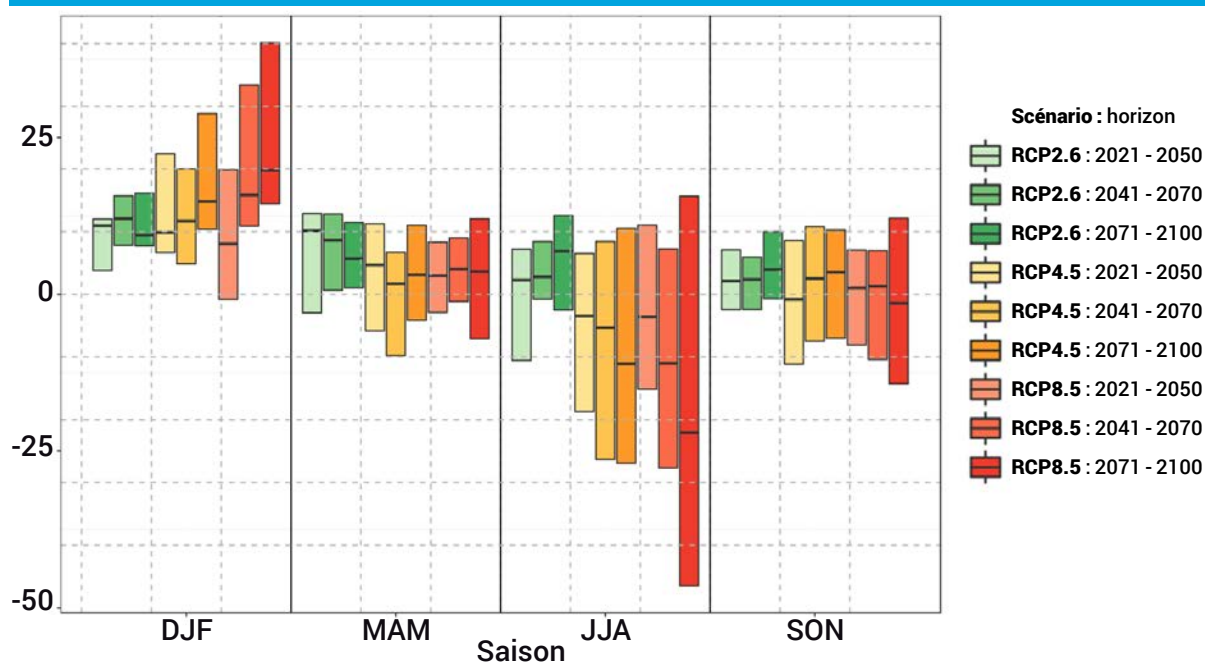


Figure 19 : Graphique de l'évolution saisonnière des écarts relatifs du cumul des précipitations totales par RCP et horizon temporel.

SYNTHÈSE POUR LES ÉCARTS DE PRÉCIPITATIONS

Les trois tableaux ci-contre présentent les enveloppes (centile 5, médiane et centile 95) de l'évolution de l'écart relatif de cumul de précipitation attendues par horizon temporel et par RCP pour l'année, l'hiver et l'été.

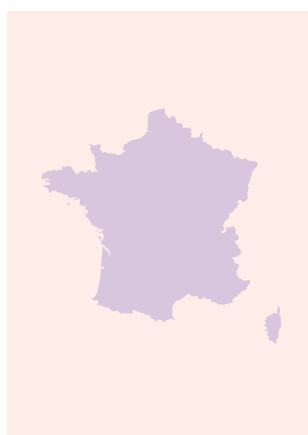
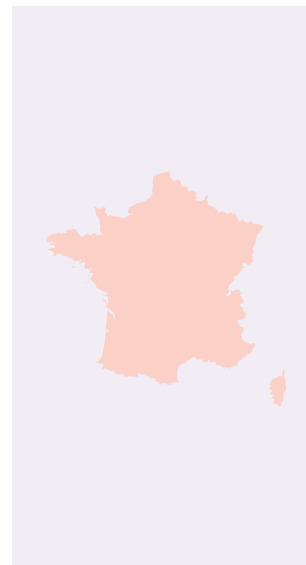
Année	RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5	
	Médiane	[C5 ; C95]	Médiane	[C5 ; C95]	Médiane	[C5 ; C95]
H1	+4,8 %	[-1,6 ; +7,9]	+2,8 %	[-1,4 ; +6,4]	+2,2 %	[-2,2 ; +7,7]
H2	+6,2 %	[+1,1 ; +8,5]	+1,6 %	[-3,3 ; +7,8]	+3,4 %	[-2,0 ; +10,2]
H3	+6,5 %	[+3,5 ; +9,3]	+2,9 %	[-0,8 ; +10,9]	+1,8 %	[-6,4 ; +15,1]

Hiver	RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5	
	Médiane	[C5 ; C95]	Médiane	[C5 ; C95]	Médiane	[C5 ; C95]
H1	+9,9 %	[+2,6 ; +12,0]	+9,9 %	[+6,6 ; +22,4]	+8,1 %	[-0,8 ; +19,8]
H2	+11,3 %	[+6,8 ; +15,7]	+11,7 %	[+4,8 ; +20,0]	+15,8 %	[+10,9 ; +33,4]
H3	+8,9 %	[+7,8 ; +15,9]	+14,8 %	[+10,4 ; +28,8]	+19,8 %	[+14,4 ; +40,1]

Été	RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5	
	Médiane	[C5 ; C95]	Médiane	[C5 ; C95]	Médiane	[C5 ; C95]
H1	+1,8 %	[-10,1 ; +7,1]	-3,4 %	[-18,7 ; +6,5]	-3,6 %	[-15,1 ; +11,0]
H2	+2,5 %	[-0,7 ; +8,4]	-5,3 %	[-26,3 ; +8,4]	-11,0 %	[-27,7 ; +7,2]
H3	+4,3 %	[-2,3 ; +12,5]	-11,1 %	[-27,0 ; +10,5]	-22,0 %	[-46,5 ; +15,6]

RÉSUMÉ POUR L'ÉVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS

- Le cumul de précipitation, moyennée à l'échelle de la France, est annoncée en légère hausse pour les trois scénarios entre +2 % et +6 % selon les horizons et scénarios. Cette hausse faible est cependant assortie d'une grande incertitude selon les modèles, pouvant inverser le signe de la tendance quel que soit le scénario. Cette incertitude est à mettre en relation avec la position particulière de notre pays dans une zone de transition climatique à l'échelle continentale entre hausse des précipitations au nord et baisse au sud. On note une incertitude plus forte avec le RCP8.5 où en fin de siècle l'enveloppe (5 % -95 %) de notre ensemble dépasse 20 % du cumul annuel (entre -6 % et +15 %).



- Cette évolution connaît une forte modulation saisonnière avec une hausse systématique en hiver, souvent supérieure à +10 % (atteignant même 40 % dans l'enveloppe supérieure du RCP8.5) et à l'inverse, une baisse quasi systématique en été, se renforçant au cours des horizons pour atteindre -10 à -20 % en fin de siècle avec les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 ; A noter que l'enveloppe basse du RCP8.5 prévoit même une baisse d'un facteur 2 du cumul de précipitation en été.

- Cette évolution des précipitations présente aussi une variabilité géographique sensible avec un gradient Nord/Sud ou Nord-Est/Sud-Ouest se traduisant par une hausse plus marquée sur la moitié nord et une baisse sur certaines régions de la moitié sud.



Dans ce chapitre dédié à l'évolution des événements extrêmes en France métropolitaine, on rappellera systématiquement la valeur de référence du climat récent (1976-2005) avant de présenter les évolutions projetées dans le siècle à venir.

ÉVOLUTION DES VAGUES DE CHALEUR ET CANICULES

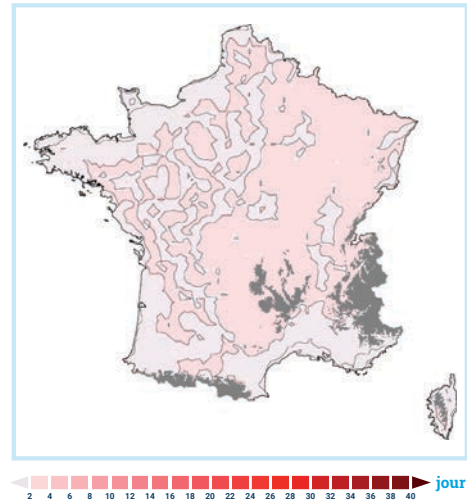
L'analyse de l'évolution des vagues de chaleur et canicules est basée sur deux indicateurs :

- un indicateur représentant l'écart à la référence du nombre de jours des événements anormalement chauds (anomalie de +5°C) durant plusieurs jours (au moins 5 jours). Pour l'analyse des vagues de chaleur, seule la période estivale est considérée.
- un indicateur représentant l'écart à la référence du nombre de jours de températures nocturnes exceptionnellement chaudes (supérieures à 20°C), rencontrées lors des épisodes caniculaires.

Vagues de chaleur

Il est rappelé qu'il existe plusieurs indicateurs fréquemment utilisés pour caractériser les vagues de chaleur et que les diagnostics ainsi obtenus peuvent différer d'autres résultats disponibles dans la littérature. L'indicateur utilisé ici fait référence au climat local et ainsi présente un nombre d'évènements voisins quelques soient les régions.

Avec un scénario RCP8.5, le nombre de vagues de chaleur estivales augmente



Rappel de la référence 1976-2005 : Dans le climat récent, les vagues de chaleur étaient relativement rares sur la plupart du territoire avec moins de 5 jours par an (moyenne de l'ordre de 3 jours).

régulièrement au cours du siècle en moyenne jusqu'à 10 à 20 jours supplémentaires près des côtes de l'Atlantique et de la Manche et de 20 à 35 jours, soit une augmentation d'un facteur 3 à plus de 10. Le quart sud est de la France est la zone la plus exposée à l'augmentation de cet aléa.

Si l'on compare les simulations des trois RCP en fin de siècle, on met en évidence que l'augmentation de la fréquence du nombre de vagues de chaleur en été est fortement dépendant du scénario considéré : +10 à +15 jours en moyenne pour un scénario RCP4.5, environ le double en RCP8.5.

En scénario RCP2.6, l'évolution projetée correspond à un doublement du nombre de jours de vagues de chaleur tandis qu'en RCP4.5, il s'agit plutôt d'un facteur 3 à 4 et en RCP8.5 d'un facteur 5 à 10.

RCP 8.5

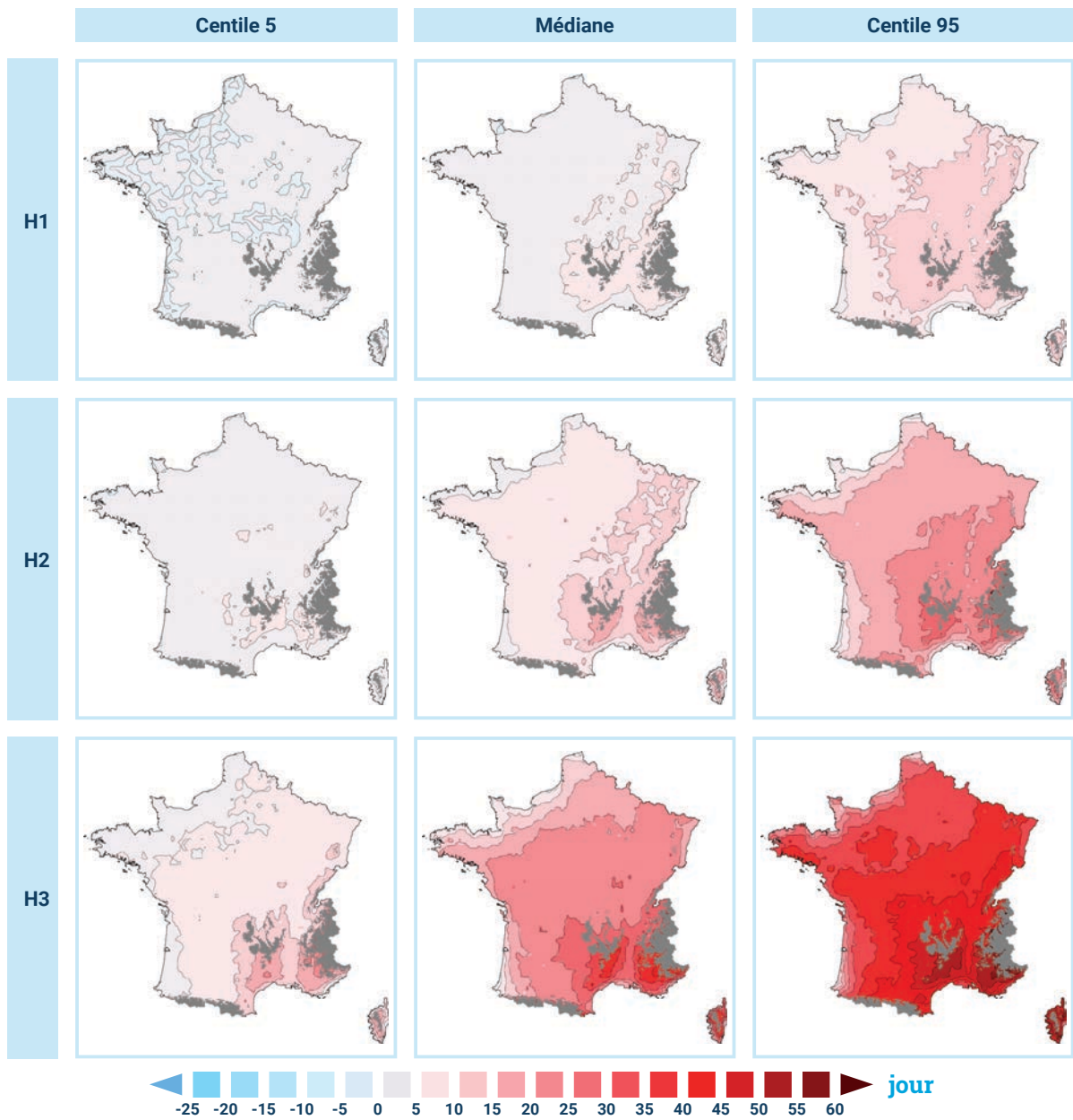


Figure 20 : Cartes des écarts de nombre de jours de vagues de chaleur pour le scénario RCP8.5 par horizon temporel et selon les paramètres de la distribution C5, C50 et C95.

Horizon "fin de siècle" (2071-2100)

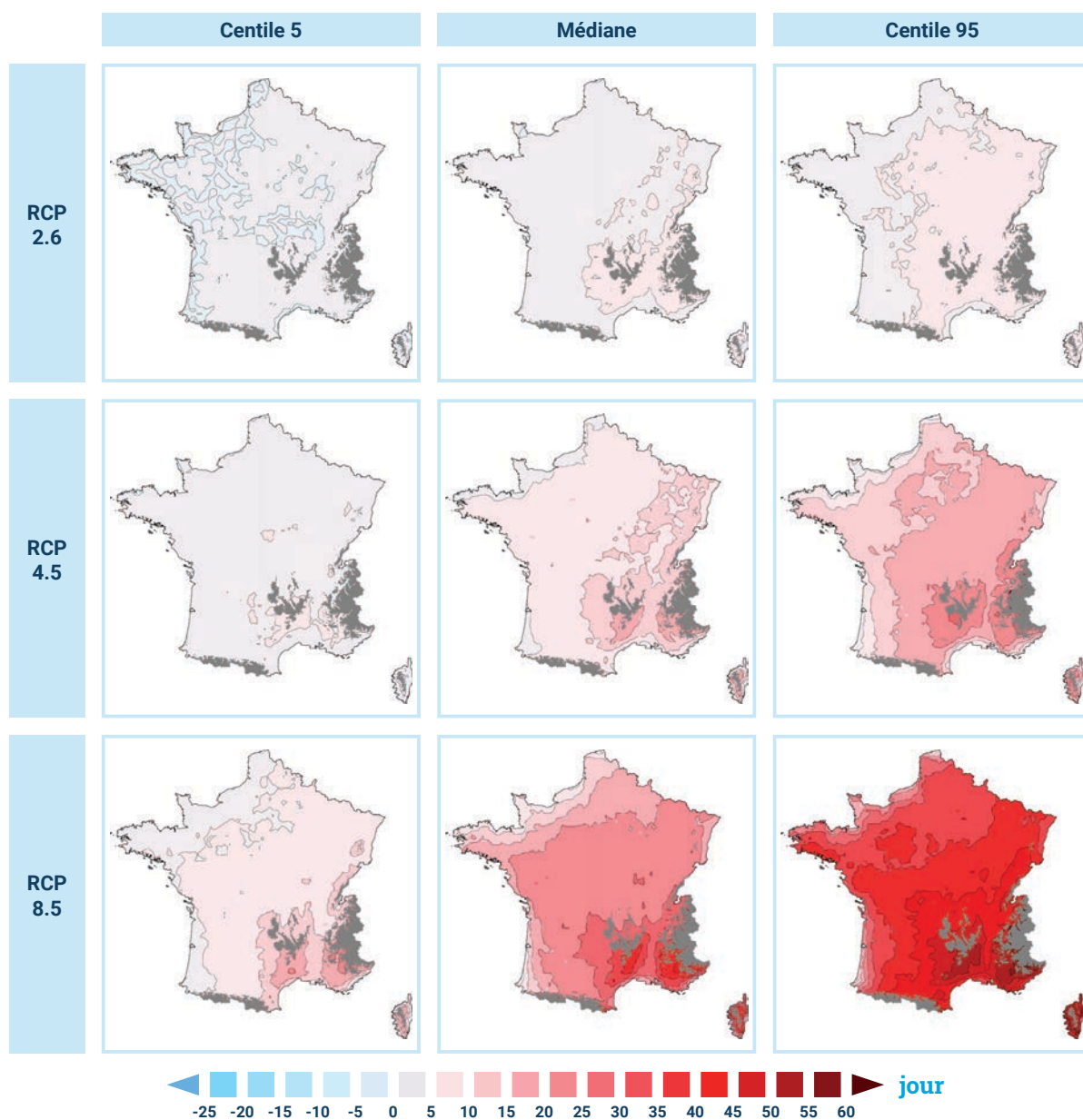
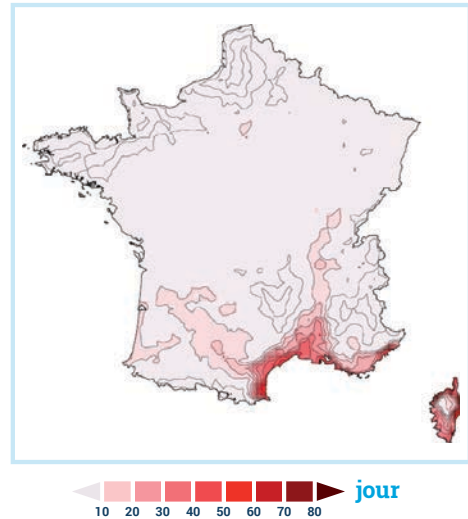


Figure 21 : Cartes des écarts de nombre de jours de vagues de chaleur à l'horizon fin de siècle pour les trois RCP et selon les paramètres de la distribution C5, C50 et C95.

Nuits tropicales

Avec un scénario RCP8.5, l'augmentation du nombre de jours de nuits tropicales sera déjà importante dès l'horizon proche sur le sud de la France (littoral méditerranéen, vallée du Rhône et midi toulousain). En milieu de siècle, les zones urbaines telles que Paris, Lyon et la vallée de la Garonne sont touchées. En fin de siècle, seules les zones de montagne et le littoral de la Manche restent quasi-épargnés tandis que l'augmentation atteint 90 jours (3 mois) sur les zones les plus exposées.

Si l'on compare à présent les simulations des trois RCP en fin de siècle, l'augmentation du nombre de nuits tropicales ne concerne pratiquement que les régions méditerranéennes (de l'ordre de 20 jours par an) en RCP2.6 tandis qu'en scénario RCP8.5, quasiment toute la France est touchée.



Rappel de la référence 1976-2005 : Dans le climat récent, les nuits tropicales ($T_n > 20^\circ\text{C}$) étaient relativement rares sur la plupart du territoire avec moins de 10 jours par an, exceptées sur le pourtour méditerranéen, les vallées du Rhône (y compris l'agglomération de Lyon) et de l'Aude.

RCP 8.5

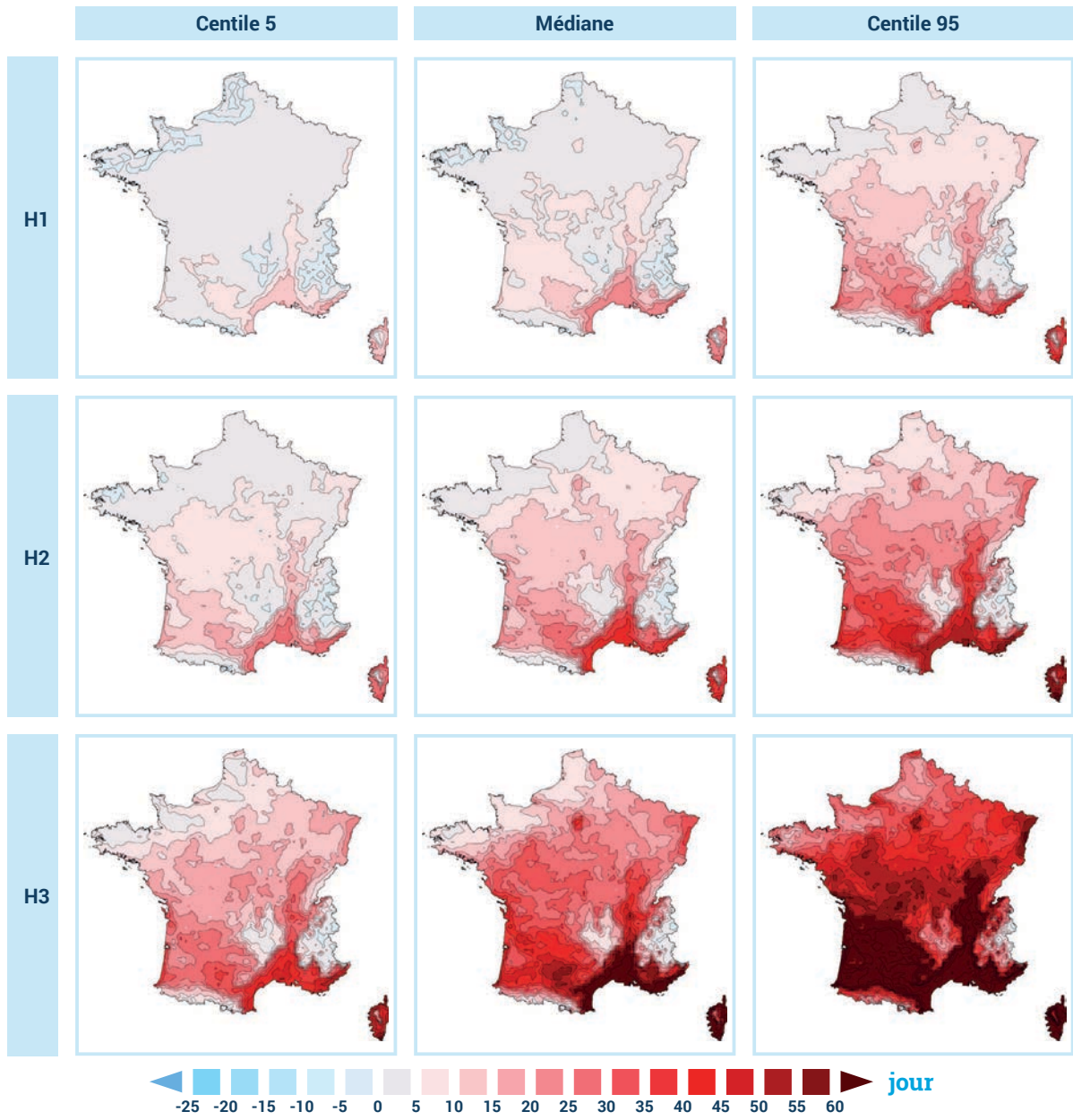


Figure 22 : Cartes des écarts de nombre de nuits tropicales pour le scénario RCP8.5 et les trois horizons et selon les paramètres de la distribution C5, C50 et C95.

Horizon "fin de siècle" (2071-2100)

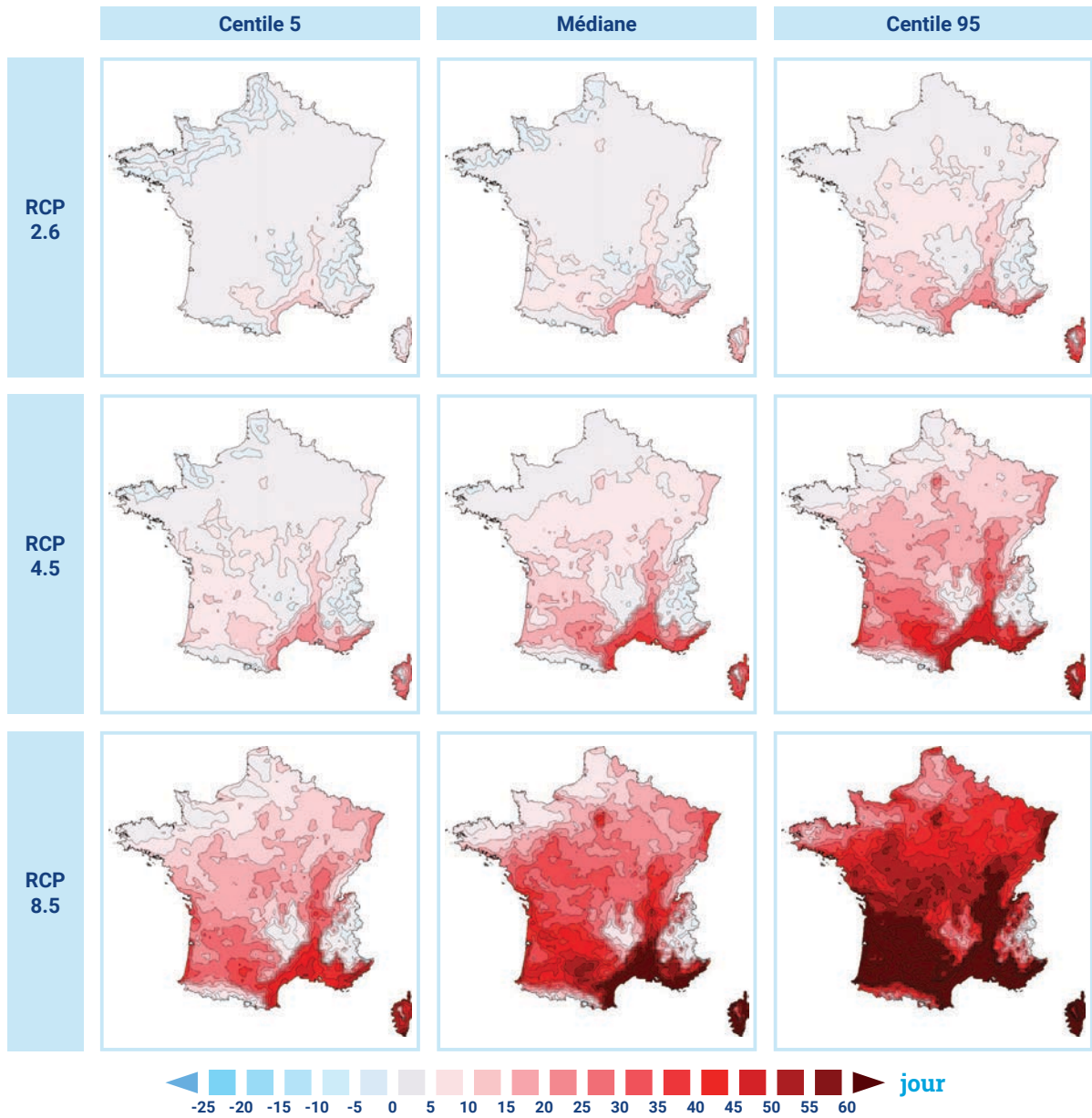
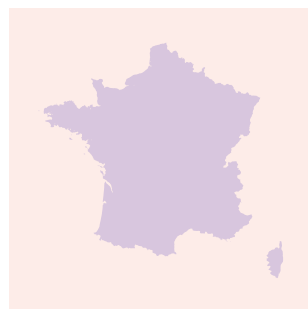
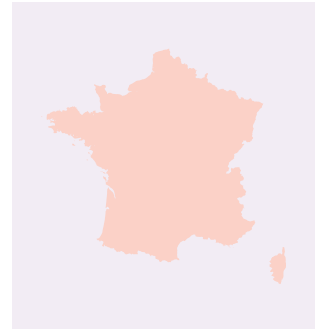


Figure 23 : Cartes des écarts de nombre de nuits tropicales à l'horizon fin de siècle pour les trois RCP et selon les paramètres de la distribution C5, C50 et C95.

RÉSUMÉ POUR L'ÉVOLUTION DES VAGUES DE CHALEUR ET CANICULES

- ▶ Le nombre de jours de vagues de chaleur ou de canicules est annoncé en hausse dans tous les scénarios avec une intensité dépendant fortement du scénario et de l'horizon temporel. En fin de siècle, le nombre de jours de vagues de chaleur pourra doubler avec un scénario RCP2.6 mais être multiplié par un facteur 3 à 4 en RCP4.5 et 5 à 10 en RCP8.5.



- ▶ Les nuits tropicales quasi inconnues dans le nord de la France pourront revenir régulièrement en scénario RCP2.6 tandis que leur nombre pourra atteindre (hors région Méditerranéenne) 15 à 25 jours en scénario RCP4.5 et 30 à 50 jours en RCP8.5.

- ▶ Cette évolution est exacerbée dans les régions actuelles les plus chaudes, notamment l'arc méditerranéen, le couloir rhodanien et la vallée de la Garonne. Sur ces régions, les vagues de chaleur et journées caniculaires pourront s'étaler sur des périodes supérieures à un ou deux mois en été.



ÉVOLUTION DES VAGUES DE FROID ET DES JOURNÉES DE GEL

L'analyse de l'évolution des vagues de froid et des journées de gel est basée sur deux indicateurs :

- un indicateur représentant l'écart à la référence du nombre de jours des événements anormalement froids (anomalie de +5°C) en hiver durant plusieurs jours (au moins 5 jours)
- un indicateur représentant l'écart à la référence du nombre de jours de gelées (températures minimales inférieures à 0°C).

Évolution des vagues de froid

Il est rappelé qu'il existe plusieurs indicateurs fréquemment utilisés pour caractériser les vagues de froid et que les diagnostics ainsi obtenus peuvent différer d'autres résultats disponibles dans la littérature. Les cartes présentées ci-dessous utilisent un masque sur les zones de relief (altitude supérieure à 1000 m) où les températures froides sont plus habituelles. Il est noté que s'agissant d'évolution négative, le centile 5 correspond ici aux valeurs les plus fortes (inversement pour le centile 95).

Avec un scénario RCP8.5, le nombre de jours de vagues de froid diminue tout au long des trois horizons avec une diminution plus forte sur le quart nord est où les vagues de froid sont les plus présentes aujourd'hui. A noter que la variation est très faible entre les horizons H2 et H3, les événements de vague de froid étant devenues très rares.



Rappel de la référence 1976-2005 : Dans le climat récent, les journées de vagues de froid étaient présentes sur la plupart du territoire, de l'ordre de 1 à 3 jours par an, jusqu'à 5 jours sur le Grand Est.

Si l'on compare à présent les simulations des trois RCP en fin de siècle, on constate que la diminution des jours de vagues de froid se retrouve dans les trois scénarios avec une intensité fonction du réchauffement projeté en hiver. Avec une diminution de l'ordre de 2 jours en RCP2.6, la fréquence de l'aléa a été divisée par 2 tandis que pour les RCP4.5 et RCP8.5 (très proches) la survenue d'un événement de type vague de froid devient proche en moyenne de 1 jour par an voire moins dans la partie basse de la distribution (centile 5).

RCP 8.5

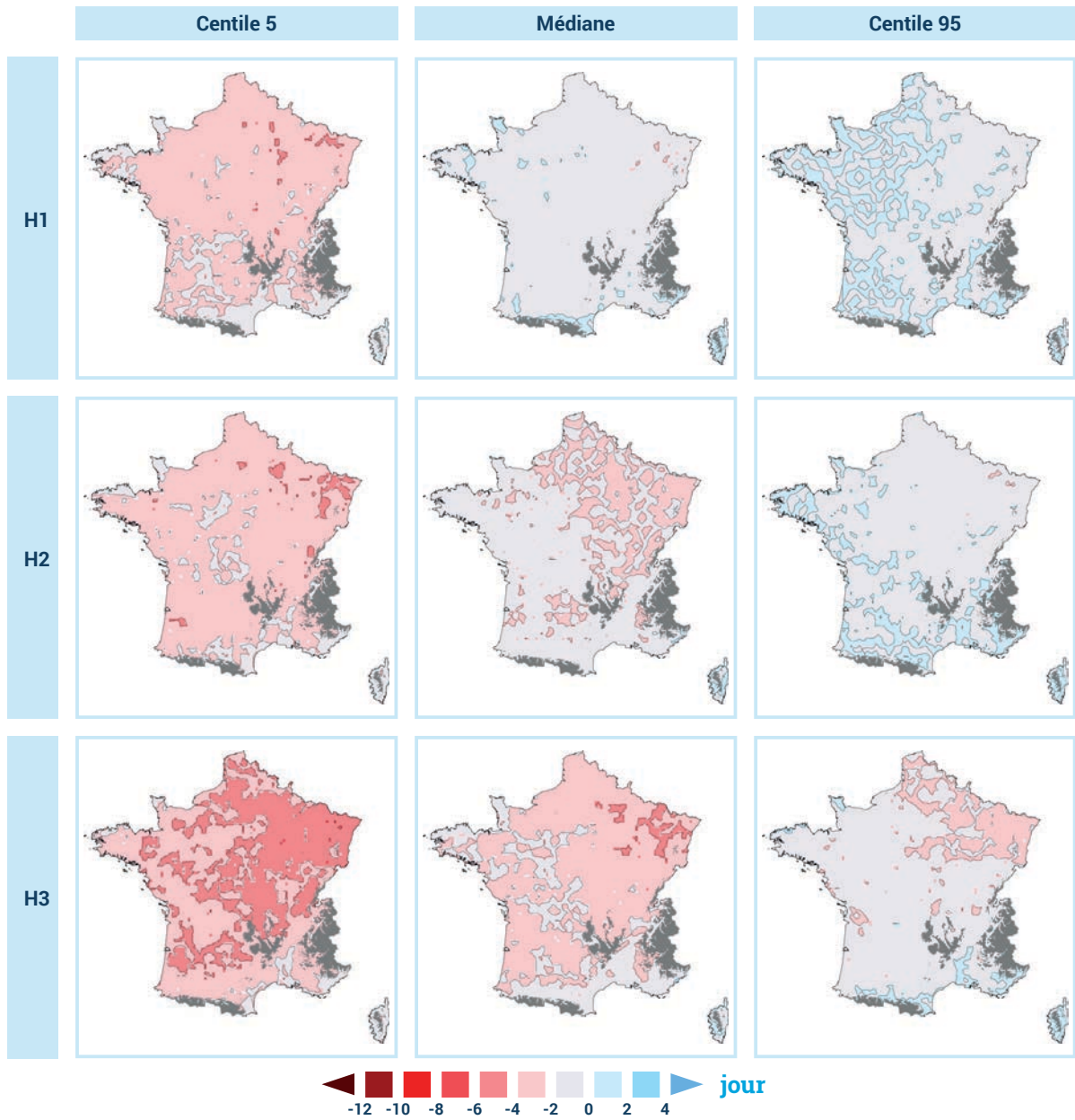


Figure 24 : Cartes des écarts de nombre de jours de vagues de froid pour le RCP8.5 et les trois horizons et selon les paramètres de la distribution C5, C50 et C95.

Horizon "fin de siècle" (2071-2100)

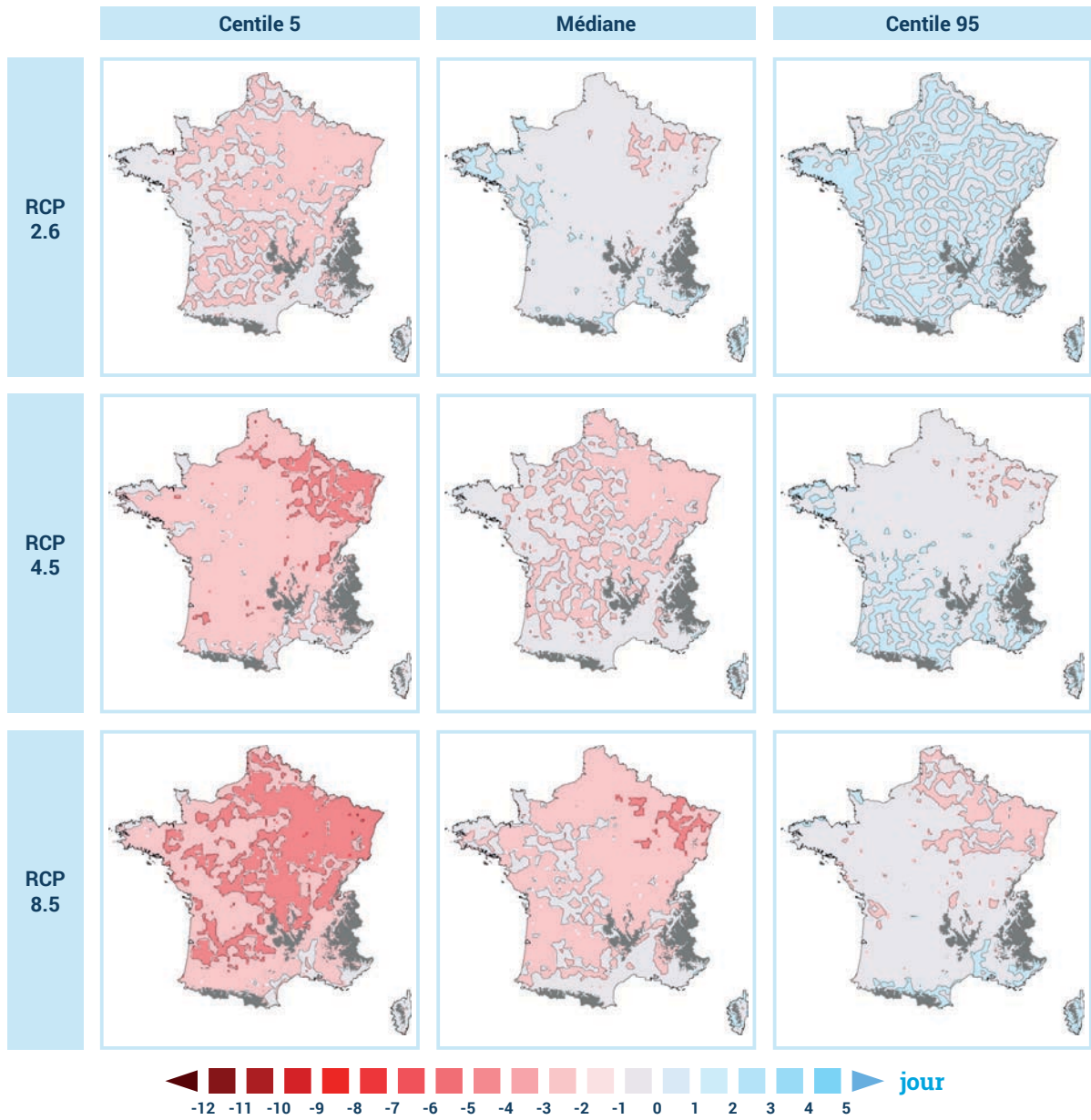


Figure 25 : Cartes des écarts de nombre de jours de vagues de froid à l'horizon fin de siècle pour les trois RCP et selon les paramètres de la distribution C5, C50 et C95.

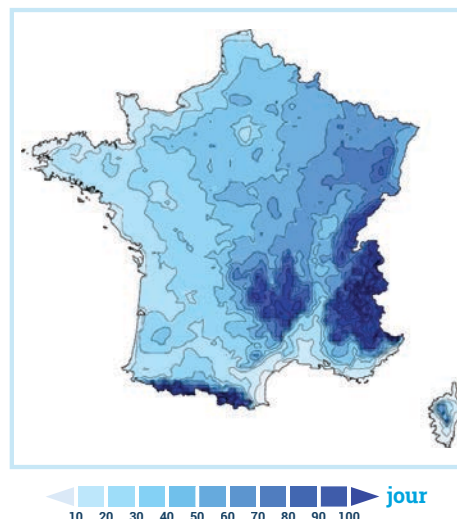
Évolution des journées de gel

Comme pour les vagues de froid, il est noté que s'agissant d'évolution négative, le centile 5 correspond ici aux valeurs les plus fortes (inversement pour le centile 95).

Avec un scénario RCP8.5, le nombre de jours de gelée diminue sensiblement au cours des trois horizons avec une intensité fonction du nombre de jours observés dans le climat récent. En fin de siècle, la diminution atteint en moyenne une vingtaine de journées dans le sud ouest et de l'ordre de 40 jours dans l'Est et 60 jours en montagne. Les gelées deviennent un événement rare.

Si l'on compare à présent les simulations des trois RCP en fin de siècle, la diminution du nombre de jours de gel se retrouve dans les trois scénarios avec une intensité dépendant du réchauffement projeté.

En fin de siècle, la diminution du nombre de jours de gelées est en scénario RCP2.6 de l'ordre de 10 à 15 jours soit une réduction d'un facteur 2, tandis qu'en RCP4.5 et RCP8.5, ce nombre atteint 20 à 35 jours soit quasiment autant que la normale actuelle : les journées de gel pourront devenir des événements rares.



Rappel de la référence 1976-2005 : Dans le climat récent, les gelées étaient fréquentes sur la plupart du territoire, excepté le littoral méditerranéen et océanique, de l'ordre de 20 à 40 jours en plaine jusqu'à 60 j dans le grand Est, voire 100 j en montagne.

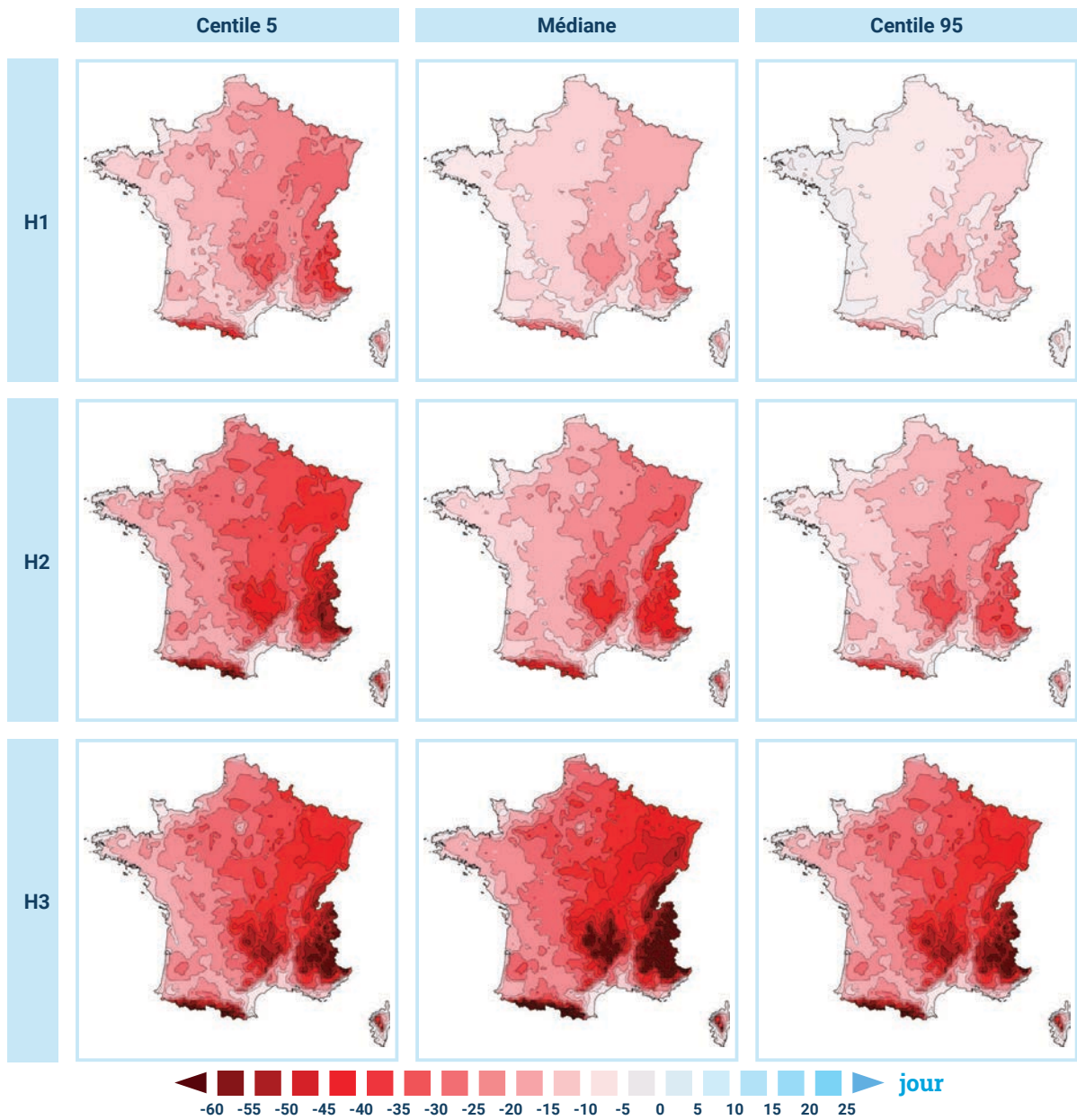


Figure 26 : Cartes des écarts de nombre de jours de gelées à l'horizon fin de siècle par rapport à la période de référence pour le RCP8.5 et les trois horizons selon les paramètres de la distribution C5, C50 et C95.

Horizon "fin de siècle" (2071-2100)

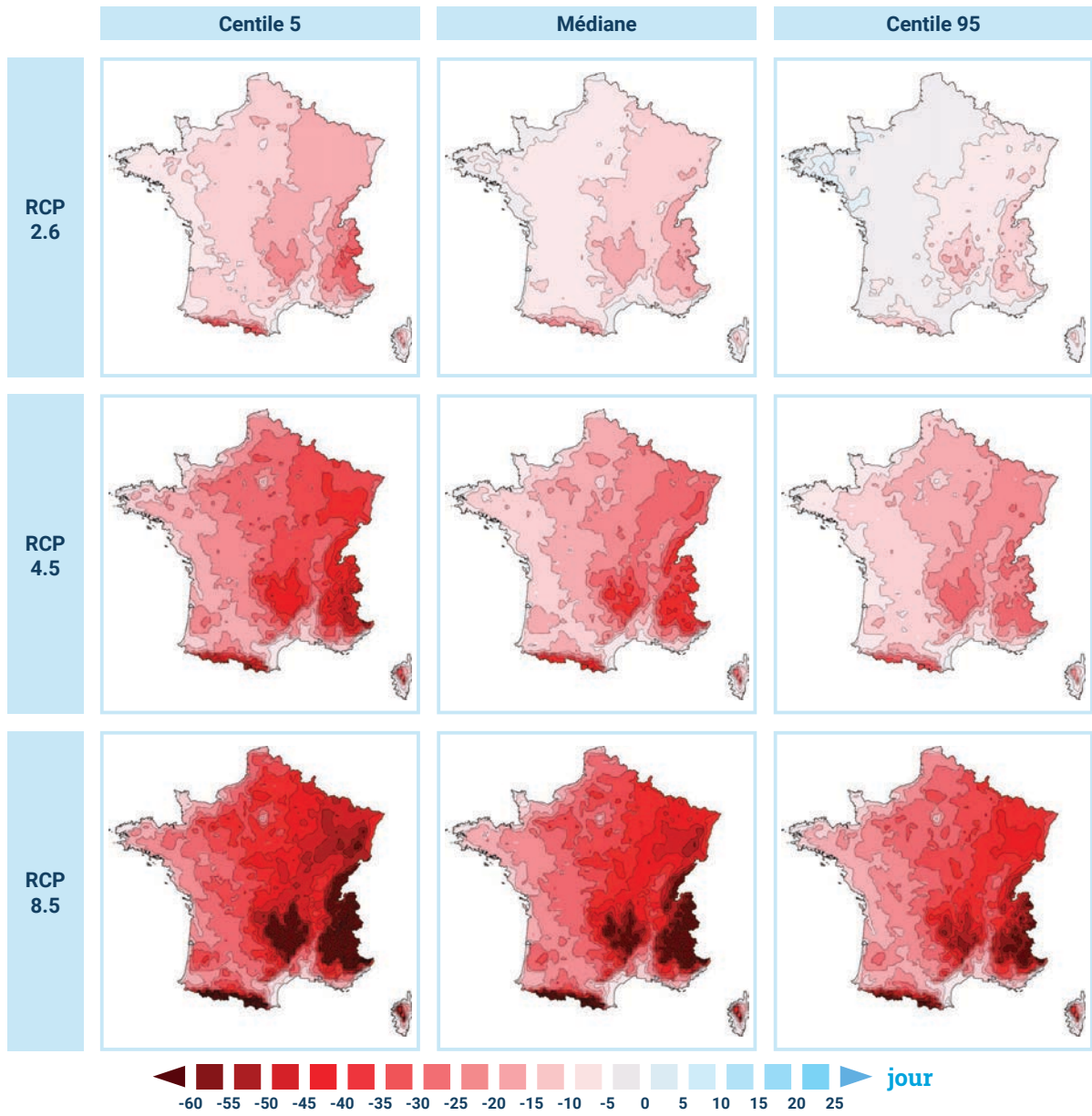
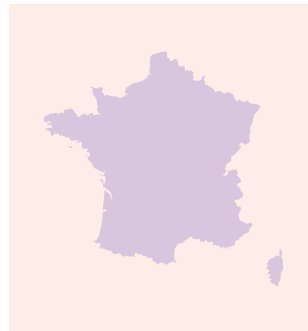
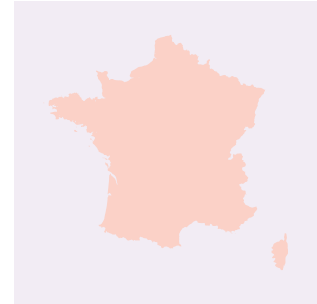


Figure 27 : Cartes des écarts de nombre de jours de gelées à l'horizon fin de siècle par rapport à la période de référence pour les 3 RCP et les trois horizons selon les paramètres de la distribution C5, C50 et C95.

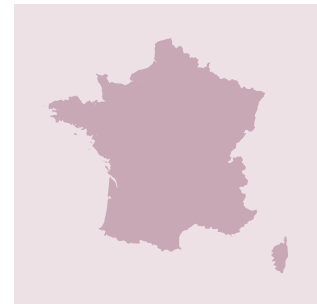
RÉSUMÉ POUR L'ÉVOLUTION DES VAGUES DE FROID ET DES JOURNÉES DE GEL

- ▶ Le nombre de jours de vagues de froid ou de gelée est en baisse dans tous les scénarios avec une intensité dépendant fortement du scénario et de l'horizon temporel.



- ▶ En fin de siècle, le nombre de jours de vagues de froid pourra être divisé par 2 avec un scénario RCP2.6 mais se réduire à 1 jour par an en moyenne en RCP4.5 et RCP8.5. A l'identique, le nombre de journées de gel pourra être divisé par 2 en scénario RCP2.6 tandis qu'en scénario RCP4.5 et RCP8.5, les gelées pourront devenir un événement rare.

- ▶ Cette diminution est plus forte dans les régions actuellement les plus froides (Est de la France et zones de montagne).

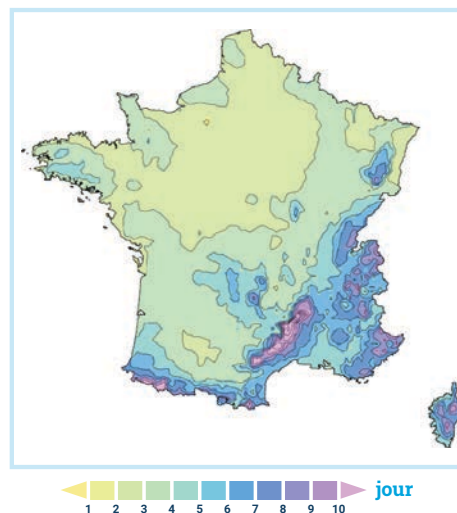


ÉVOLUTION DES PLUIES EXTRÊMES

L'analyse de l'évolution des pluies extrêmes est basée sur un indicateur qui représente l'écart à la référence du centile 99 du cumul quotidien de précipitation, c'est à dire la valeur la plus forte de cumul annuel quotidien que l'on rencontre dans 1 % des cas.

Avec un scénario RCP8.5, on observe de manière générale une augmentation assez homogène sur le pays des pluies intenses de l'ordre de 3 à 6 mm, et parfois plus sur la moitié est et notamment le relief : Cévennes, Alpes du Nord, Jura et Vosges. A noter que certaines simulations (centile 5) prévoient une diminution des pluies intenses sur l'extrême sud du pays : Pyrénées et Méditerranée.

Les simulations des trois RCP en fin de siècle présentent pour ce paramètre des évolutions très comparables avec une hausse attendue de 3 à 6 mm sur l'ensemble du pays, pouvant être plus forte sur les reliefs de la moitié est (sur le centile 95) tandis que la hausse pourrait être moins forte, notamment sur le moitié sud (centile 5). On retiendra que l'incertitude sur l'évolution des pluies extrêmes en fin de siècle en France provient ainsi plus des modèles que du scénario socio-économique.



Rappel de la référence 1976-2005 : Dans le climat récent, la valeur la plus forte de cumul annuel quotidien que l'on rencontre dans 1 % des cas est généralement de l'ordre de 20 à 30 mm en plaine, atteignant 30 à 40 mm sur les régions méditerranéennes et dépasse 50 mm sur les reliefs du sud de la France : Cévennes, Pyrénées, Alpes et Corse.

RCP 8.5

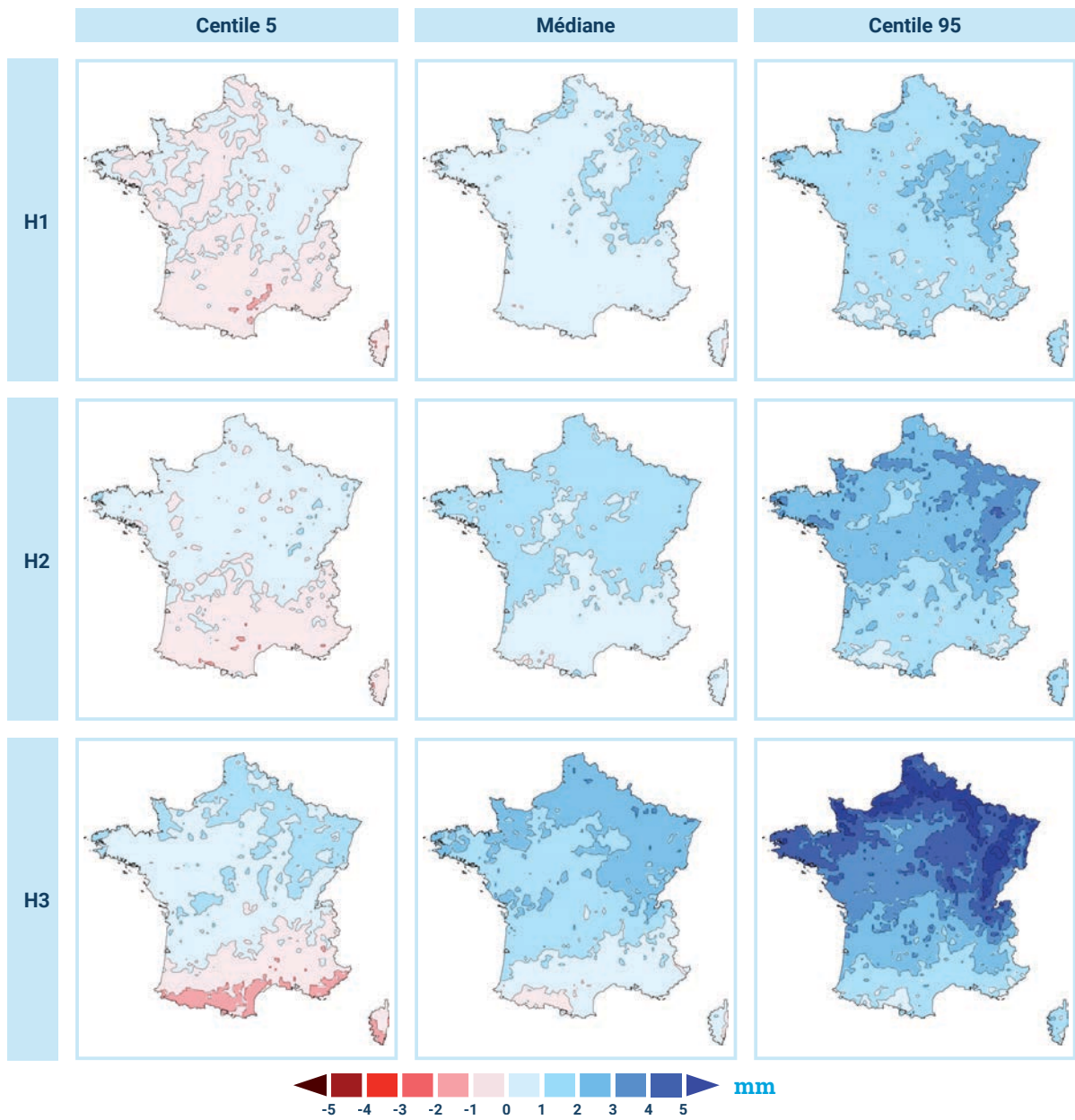


Figure 28 : Cartes des écarts de cumul de pluies extrêmes pour le RCP8.5 et les trois horizons et selon les paramètres de la distribution C5, C50 et C95.

Horizon "fin de siècle" (2071-2100)

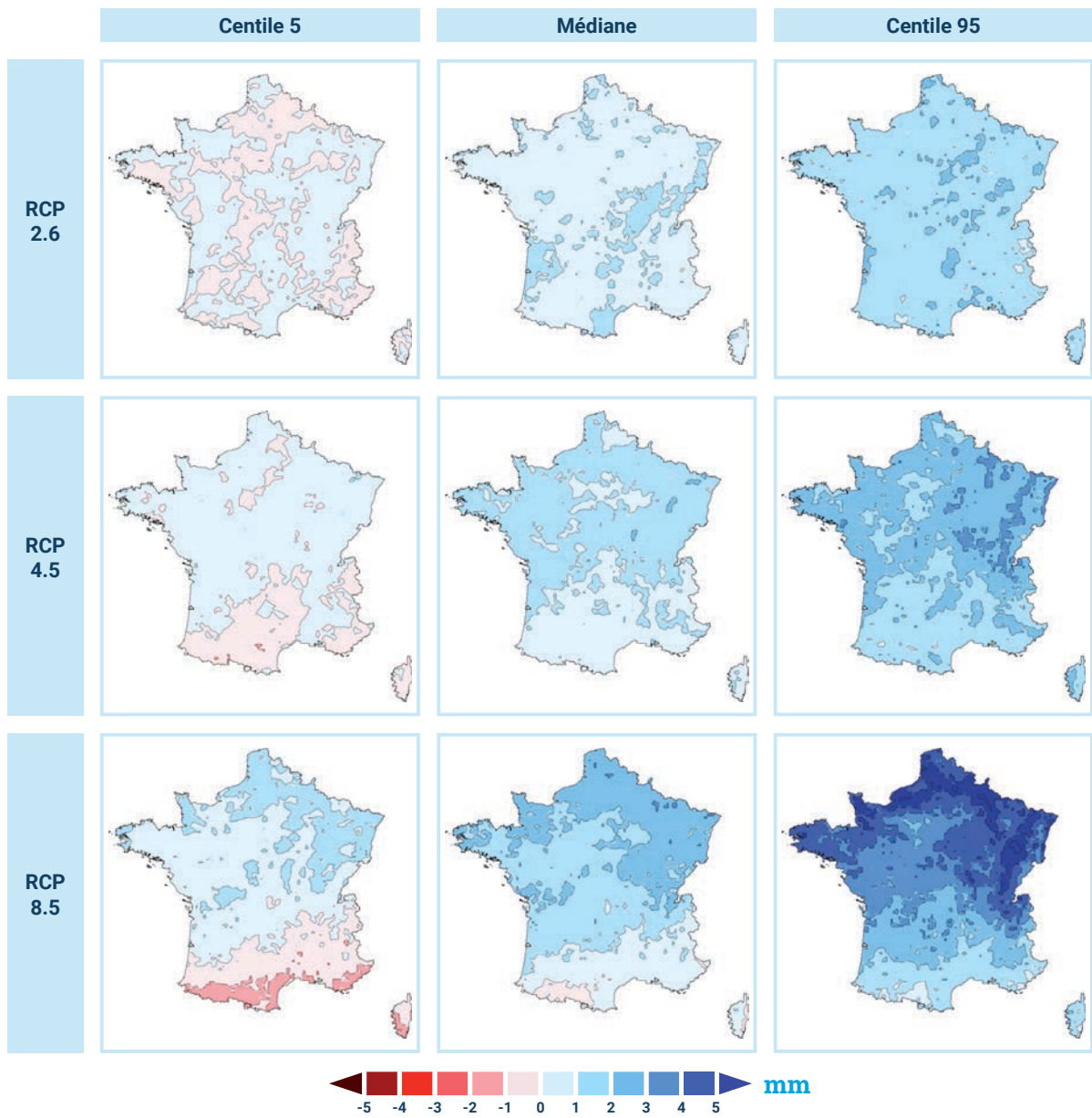
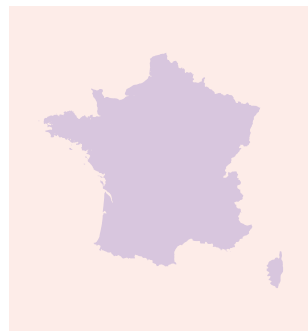
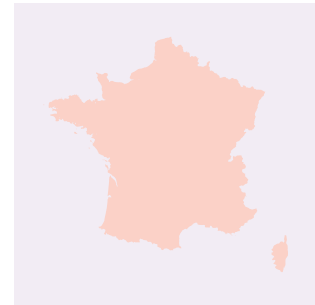


Figure 29 : Cartes des écarts de l'intensité des pluies extrêmes à l'horizon fin de siècle pour les trois RCP et selon les paramètres de la distribution C5, C50 et C95.

RÉSUMÉ POUR L'ÉVOLUTION DES PLUIES EXTRÊMES

- L'indicateur utilisé met en évidence les pluies quotidiennes les plus fortes se produisant en moyenne trois jours par an, de l'ordre de 30 à 60 mm. Il n'est pas forcément représentatif de l'évolution des pluies des épisodes méditerranéens pouvant dépasser souvent 150 mm en un jour.



- L'intensité de ces pluies extrêmes augmente légèrement tout au long du siècle sur pratiquement tout le territoire et avec les trois scénarios RCP considérés. Les régions les plus exposées sont celles de la moitié nord, notamment les frontières du nord et nord-est et le littoral de la Manche. L'intensité de la hausse attendue de 3 à 6 mm correspond à une variation de l'ordre de 10 %.

- Il est à noter que l'incertitude principale de l'évolution de ce paramètre est plus liée aux modèles climatiques qu'au choix du scénario RCP considéré.



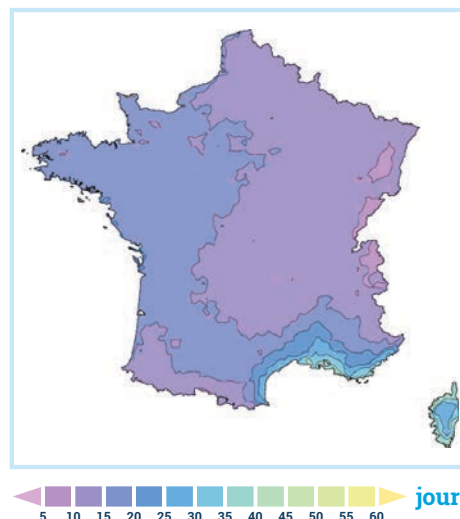
ÉVOLUTION DES SÉCHERESSES MÉTÉOROLOGIQUES ESTIVALES

Les sécheresses météorologiques caractérisent uniquement le déficit de précipitations sur une longue période. Il est rappelé que les effets du changement climatique, du fait de l'augmentation de l'évaporation sous l'effet des températures, sont plus intenses sur les autres composantes du cycle de l'eau : les sécheresses du sol et les sécheresses hydrologiques. Ces indicateurs, tels que mis à disposition sur DRIAS (jeu de données ClimSec) feront l'objet d'une mise à jour d'ici 2021 avec ce nouveau jeu de données.

Ici, nous examinons les sécheresses météorologiques estivales, à fort impact sur l'agriculture, le risque de feux de forêt et la biodiversité en général, à partir d'un indicateur caractérisant l'évolution de la durée des épisodes de jours secs consécutifs en été.

Il est rappelé qu'il existe plusieurs indicateurs fréquemment utilisés pour caractériser les sécheresses météorologiques et que les diagnostics ainsi obtenus peuvent différer d'autres résultats disponibles dans la littérature.

Selon le RCP8.5, on observe un allongement des périodes de sécheresses météorologiques estivales concernant principalement les régions méditerranéennes et la façade ouest à l'horizon « fin de siècle » d'une intensité notable de 5 à 10 jours supplémentaires de manière générale, soit



Rappel de la référence 1976-2005 : Dans le climat récent, le nombre maximum de jours secs consécutifs en été est assez variable selon les régions, allant de 10 à 15 jours sur un grand tiers nord-est et les abords des Pyrénées jusqu'à 25 à 30 jours sur le pourtour méditerranéen.

une augmentation de l'ordre de 30 à 50 % par rapport au climat actuel.

Si l'on compare à présent les simulations des trois RCP en fin de siècle, on ne relève quasiment aucune évolution des sécheresses météorologiques en RCP2.6 voire même une légère diminution. Il n'en est pas de même pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 pour lesquels on observe une augmentation de l'ordre de respectivement 5 jours et 10 jours.

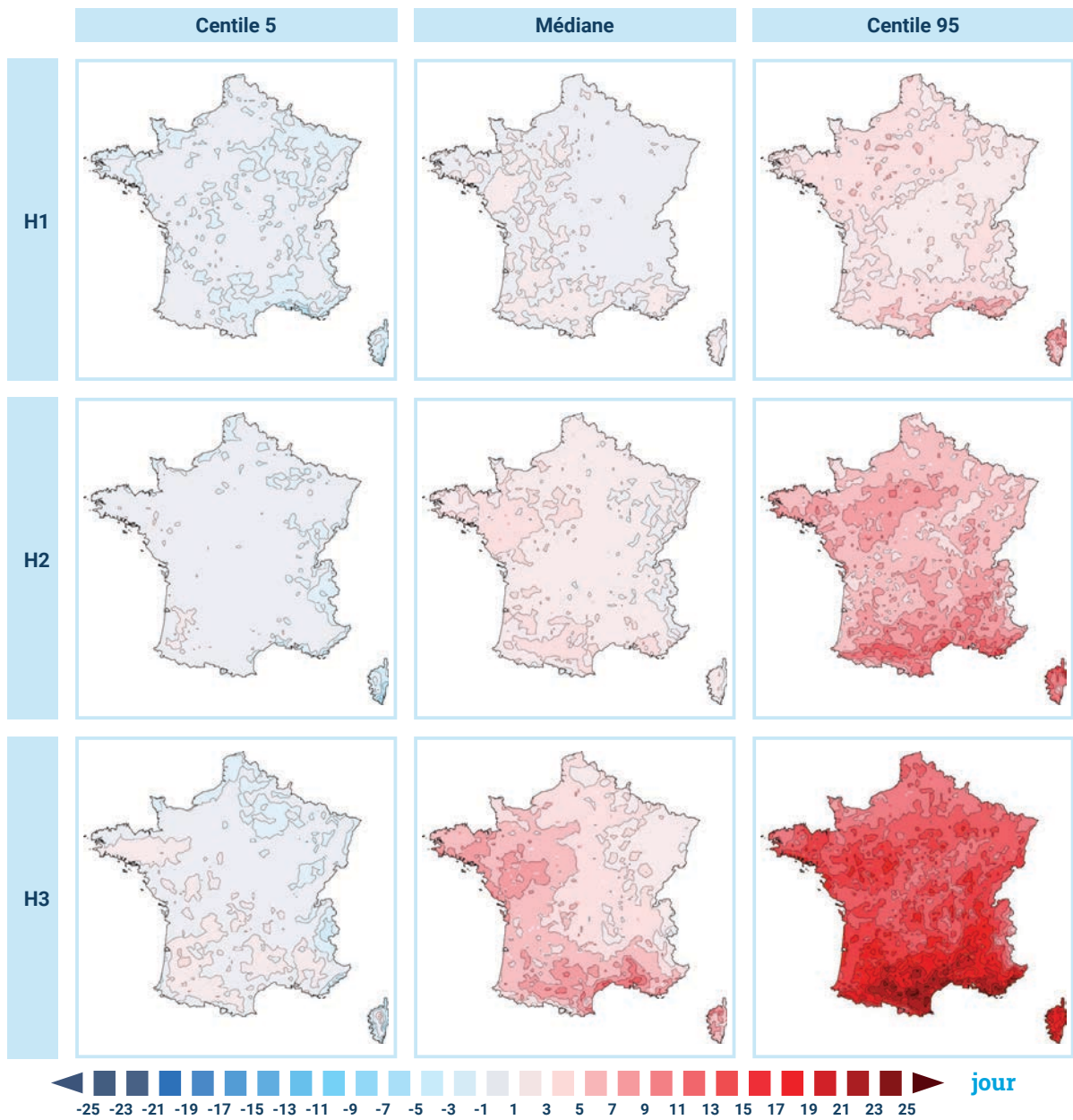


Figure 30 : Cartes des écarts du nombre maximum de jours secs consécutifs en été pour le RCP8.5 et les trois horizons et les trois horizons selon les paramètres de la distribution C5, C50 et C95.

Horizon "fin de siècle" (2071-2100)

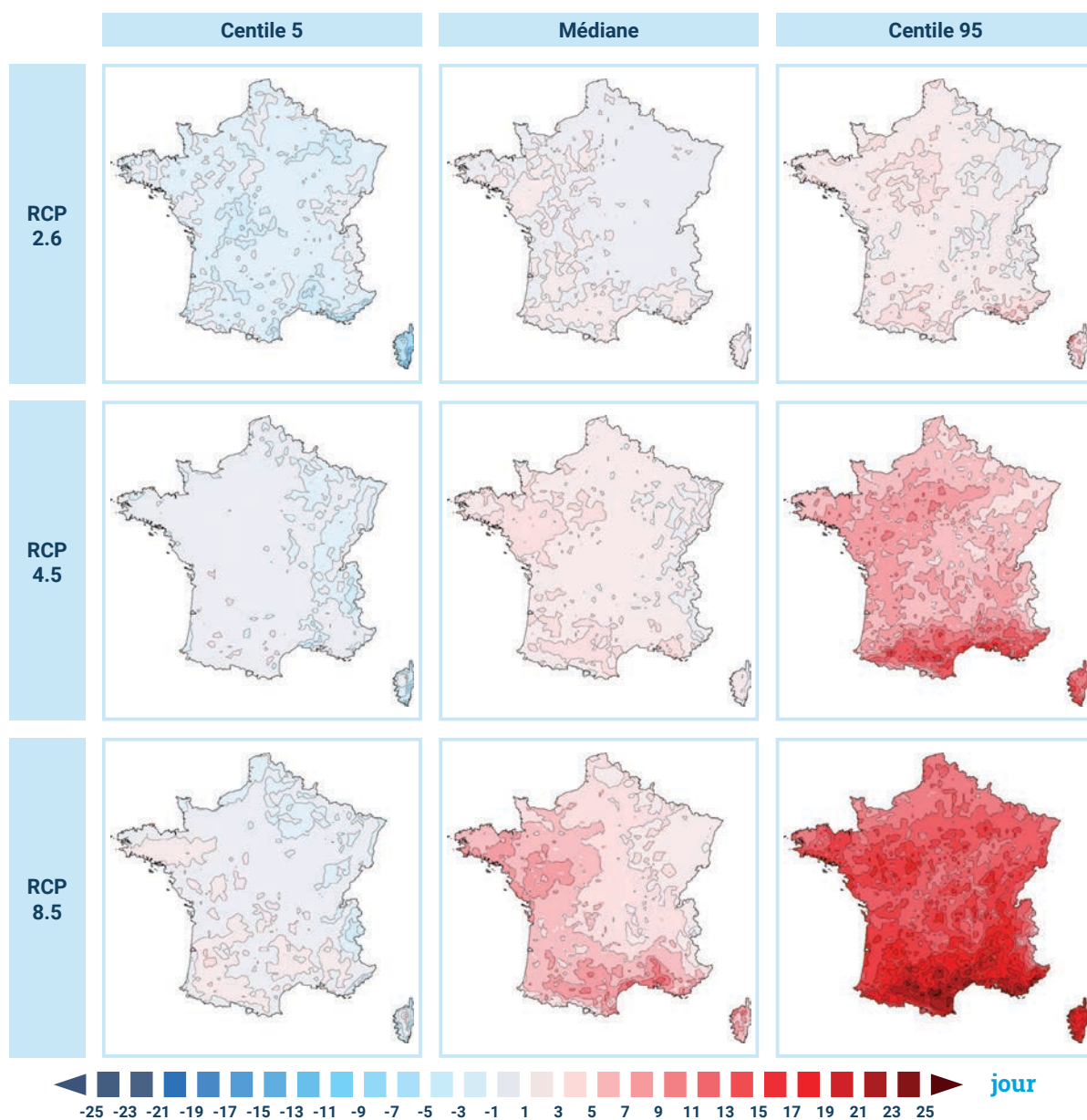
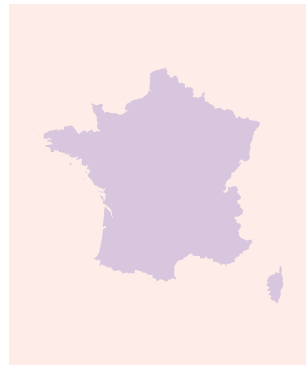
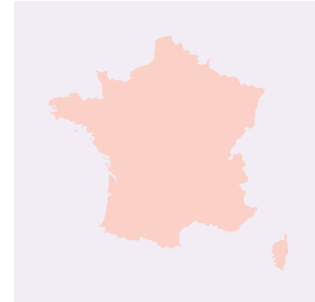


Figure 31 : Cartes des écarts du nombre de jours secs consécutifs en été pour les trois RCP et l'horizon fin de siècle selon les paramètres de la distribution C5, C50 et C95.

RÉSUMÉ POUR L'ÉVOLUTION DES SÉCHERESSES MÉTÉOROLOGIQUES ESTIVALES

- Il est rappelé que l'indicateur considéré ne concerne que les sécheresses estivales dues au déficit de précipitation sans prise en compte des effets de l'évaporation sur le sol et autres composantes hydrologiques :



- L'évolution attendue de la durée des épisodes des sécheresses météorologiques est fortement dépendant du scénario considéré et de l'horizon temporel considéré. En scénario RCP2.6, la durée de ces épisodes évolue peu, voire diminue. Avec les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, ces épisodes augmentent en fin de siècle respectivement de l'ordre de 5 à 10 jours soit une augmentation de 30 à 50 %.

- Les régions les plus concernées par ces évolutions sont celles de la moitié sud ouest du pays, et notamment le pourtour méditerranéen, le bassin aquitain et l'Ouest de la France (Bretagne et Pays de la Loire).

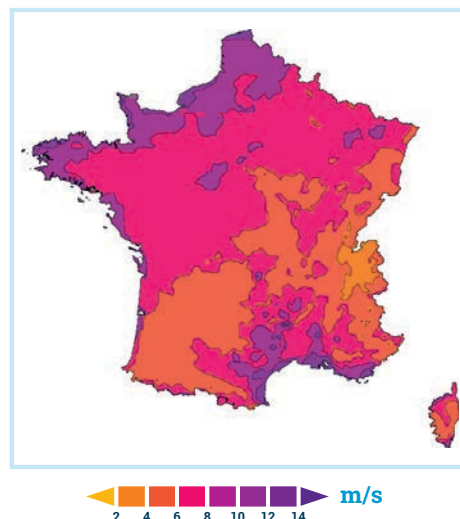


ÉVOLUTION DES VENTS FORTS

Les vents forts sont caractérisés dans le jeu DRIAS-2020 à partir d'un indicateur caractérisant la valeur des vents quotidiens maximum observés dans 2% des cas (soient 7 jours par an).

Selon le RCP8.5, on observe une évolution très différente selon les centiles de la distribution c'est à dire dépendant des modèles climatiques. En termes de signal régional, le meilleur consensus se fait pour une hausse plutôt sur le Nord Est voire la moitié nord de la France et une baisse dans le Sud, notamment le Sud Ouest.

Si l'on compare à présent les simulations des trois RCP en fin de siècle, on note très peu de différence entre les 3 RCP et toujours un écart important dans la distribution entre centile 5 et 95, montrant la forte incertitude du paramètre liée aux modèles.



Rappel de la référence 1976-2005 : Dans le climat récent, l'intensité des vents forts est assez variable selon les régions, avec un maximum sur le littoral de la Manche et de la Méditerranée. Il s'agit de vent quotidien moyen, très inférieur aux valeurs observées lors de rafales.

RCP 8.5

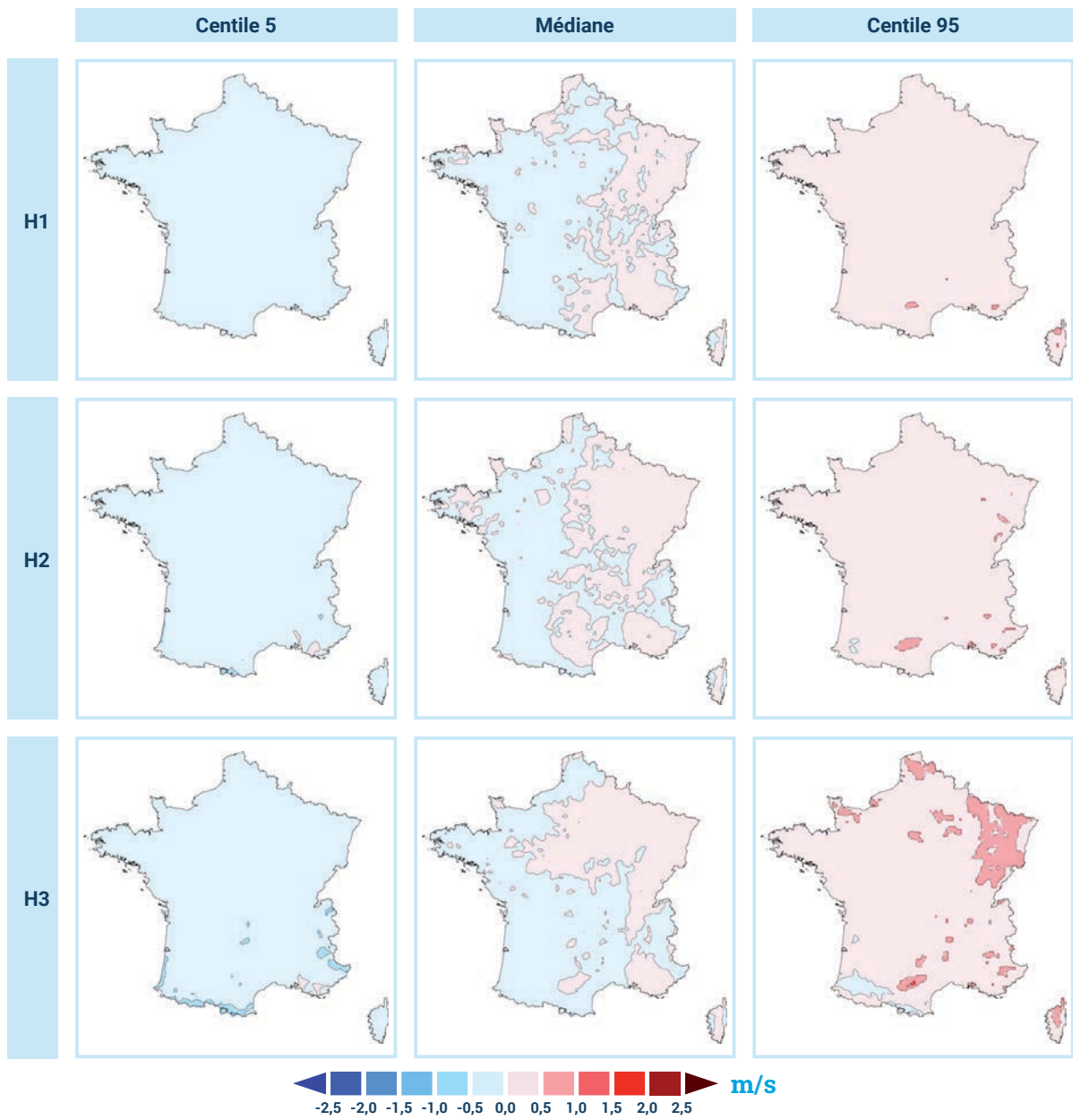


Figure 32 : Cartes des écarts de l'intensité des vents forts pour le RCP8.5 et les trois horizons, selon les paramètres de la distribution C5, C50 et C95.

Horizon "fin de siècle" (2071-2100)

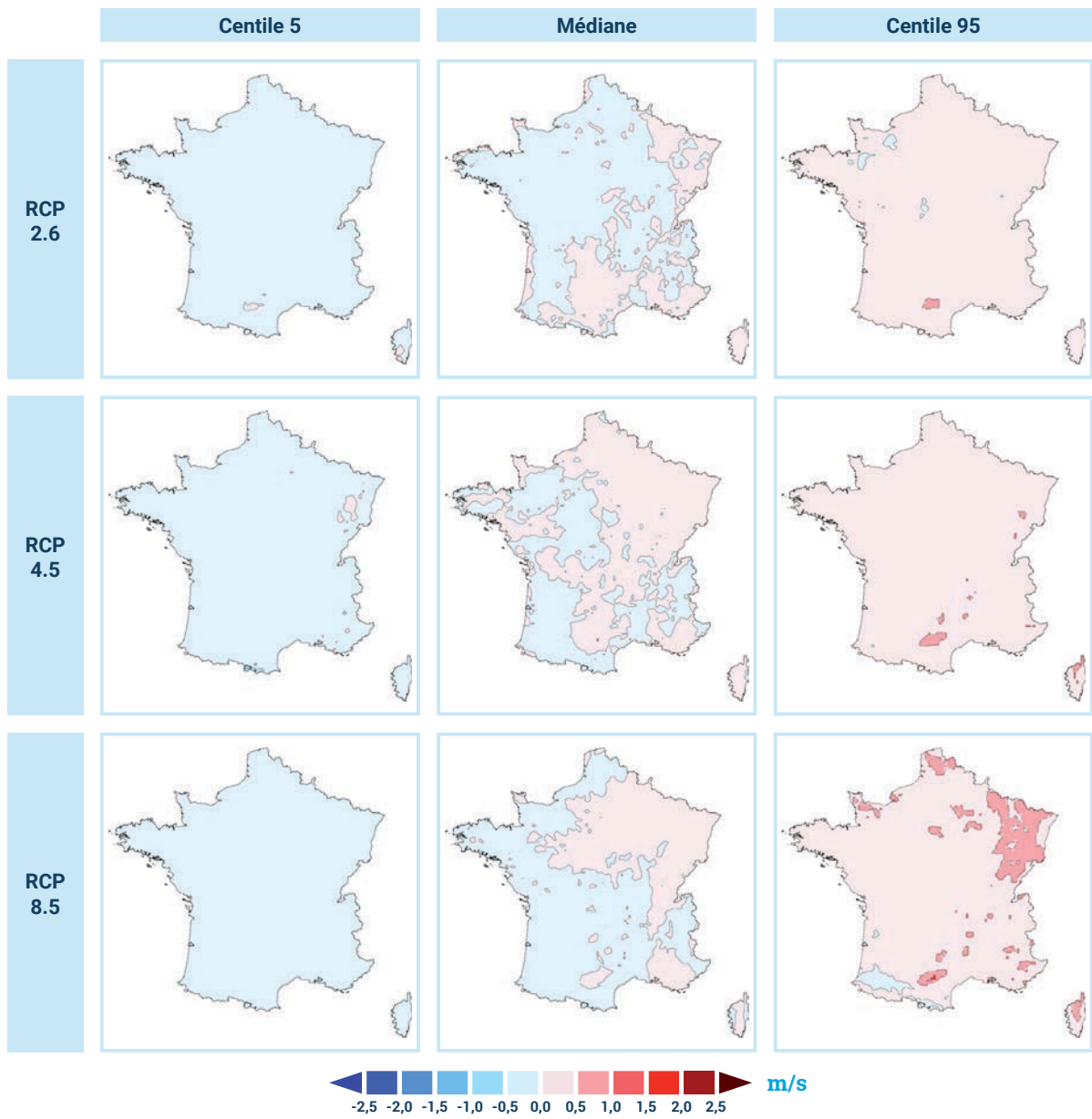
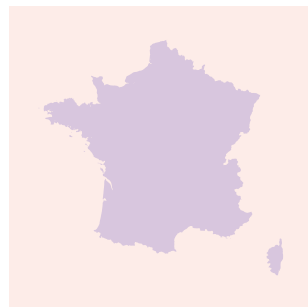
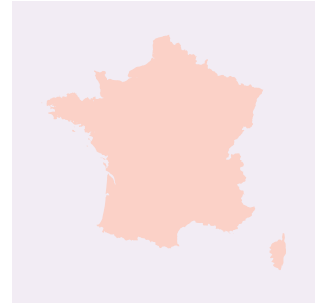


Figure 33 : Cartes des écarts de l'intensité des vents forts pour les trois RCP et l'horizon fin de siècle, selon les paramètres de la distribution C5, C50 et C95.

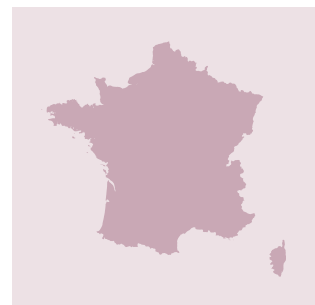
RÉSUMÉ POUR L'ÉVOLUTION DES VENTS FORTS

- Il est rappelé que l'indicateur utilisé cible les valeurs de vent moyen quotidien les plus fortes observé en moyenne 7 jours par an : son évolution n'est pas forcément représentative des valeurs les plus fortes observées lors des tempêtes ou des orages.



- L'évolution des vents forts en France présente une grande incertitude liée aux modèles climatiques, plus qu'au scénario RCP ou à l'horizon temporel.

- Les régions ayant une plus forte probabilité de renforcement du vent est le quart nord-est, voire la moitié nord. A l'inverse, la probabilité la plus forte de diminution concerne la moitié sud et particulièrement le sud-ouest.



Le nouveau jeu DRIAS-2020 s'appuie sur un ensemble de trente simulations climatiques régionalisées sur le XXI^e siècle pour la Métropole, corrigées avec la méthode ADAMONT appliquée sur la base de référence SAFRAN. Ce sous-ensemble des simulations disponibles dans la base Eurocordex a été sélectionné pour sa représentativité des évolutions futures de température et précipitation sur la France métropolitaine.

Un diagnostic sur l'évolution du climat au XXI^e siècle a été établi à partir de cet ensemble de simulations qui couvre trois scénarios socio-économiques RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 :

- La température moyenne est en hausse pour les trois scénarios, avec une hausse continue jusqu'en fin de siècle pour le RCP4.5 et RCP8.5, pour lesquels les valeurs médianes atteignent respectivement +2,1°C et +3,9°C mais jusqu'à +2,7°C et +4,9°C dans l'enveloppe haute de la distribution. Ce réchauffement, plus marqué l'été que les autres saisons, présente sur la métropole un gradient sud-est/nord-ouest avec une évolution plus forte d'environ +1°C sur la partie est du pays.

- Cette évolution de la température se traduit aussi sur les extrêmes. Le nombre de jours de vagues de chaleur ou de canicules est en hausse dans tous les scénarios avec une intensité dépendant fortement du scénario et de l'horizon temporel. En fin de siècle, le nombre de jours de vagues de chaleur pourra doubler avec un scénario RCP2.6 mais être multiplié par un facteur 3 à 4 en RCP4.5 et 5 à 10 en RCP8.5. Les nuits tropicales

quasi inconnues dans le nord de la France pourront revenir régulièrement en scénario RCP2.6 tandis que leur nombre pourra atteindre (hors région Méditerranéenne) 15 à 25 jours en scénario RCP4.5 et 30 à 50 jours en RCP8.5. A l'inverse, le nombre de jours de vagues de froid ou de gelée est en baisse dans tous les scénarios avec une intensité dépendant fortement du scénario et de l'horizon temporel. En fin de siècle, le nombre de jours de vagues de froid pourra être divisé par 2 avec un scénario RCP2.6 mais se réduire à 1 jour par an en moyenne en RCP4.5 et RCP8.5. A l'identique, le nombre de journées de gel pourra être divisé par 2 en scénario RCP2.6 tandis qu'en scénario RCP4.5 et RCP8.5, les gelées pourront devenir un événement rare.

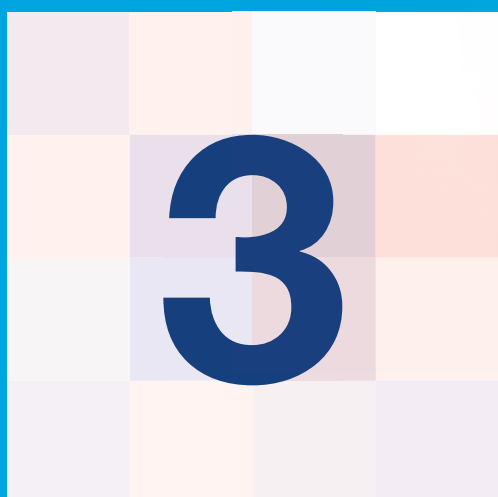
- Concernant les précipitations, le cumul moyenné à l'échelle de la France est en légère hausse pour les trois scénarios entre +2% et +6% selon les horizons et scénarios. Cette hausse faible est cependant assortie d'une grande incertitude selon les modèles, pouvant inverser le signe de la tendance quel que soit le scénario. Cette évolution connaît une forte modulation saisonnière avec une hausse systématique en hiver, souvent supérieure à +10% et à l'inverse, une baisse quasi systématique en été, se renforçant au cours des horizons pour atteindre -10 à -20% en fin de siècle avec les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Cette évolution des précipitations présente aussi une variabilité géographique marquée avec un gradient Nord/Sud ou Nord-Est/Sud-Ouest se traduisant par une hausse plus marquée sur la moitié nord et une baisse sur certaines régions de la moitié sud.

■ L'évolution des extrêmes liés aux précipitations présente plus d'incertitudes. L'intensité des pluies extrêmes augmente légèrement tout au long du siècle sur pratiquement tout le territoire et avec les trois scénarios RCP considérés. Les régions les plus concernées par cette évolution sont celles de la moitié nord, notamment les frontières du nord et nord-est et le littoral de la Manche. L'intensité de la hausse attendue de 3 à 6 mm correspond à une variation de l'ordre de 10 %.

L'évolution de la durée des épisodes des sécheresses météorologiques dépend du scénario et de l'horizon temporel considéré. En scénario RCP2.6, la durée de ces épisodes évolue peu, voire diminue. Avec les scénarios RCP4.5 et RCP8.5,

ces épisodes augmentent en fin de siècle respectivement de l'ordre de 5 à 10 jours soit une augmentation de 30 à 50%. Les régions les plus concernées par ces évolutions sont celles de la moitié sud ouest du pays, et notamment le pourtour méditerranéen, le bassin aquitain et l'Ouest de la France (Bretagne et Pays de la Loire).

■ L'évolution des vents forts en France a aussi été étudiée et présente une grande incertitude liée aux modèles climatiques, plus qu'au scénario socio-économique ou à l'horizon temporel. Les régions ayant une plus forte probabilité de renforcement du vent est le quart nord-est, voire la moitié nord. A l'inverse, la probabilité la plus forte de diminution concerne la moitié sud et particulièrement le sud-ouest.



EN SAVOIR PLUS SUR LE JEU
DRIAS-2020

LES PRINCIPES DE LA MODÉLISATION CLIMATIQUE

Le climat futur peut être évalué en utilisant des projections climatiques. Il s'agit de simulations numériques réalisées à l'aide de modèles climatiques.

Un modèle climatique est un programme informatique qui résout à l'aide d'ordinateurs puissants un ensemble complexe d'équations qui décrit le comportement du système climatique, composé de l'atmosphère, les surfaces continentales, l'océan, les aérosols, la glace de mer, la végétation, les rivières..., en réponse à des forçages externes qui lui sont imposés. Les forçages climatiques sont des perturbations d'origine extérieure au système climatique qui impactent son bilan radiatif : différence entre l'énergie reçue par le Soleil et l'énergie rayonnée par la Terre vers l'espace. Les forçages sont de deux types : naturels, notamment les variations du rayonnement solaire, les aérosols désertiques ou les éruptions volcaniques, ou anthropiques, dûs aux activités humaines tels que les gaz à effet de serre (GES), les aérosols d'origine anthropique liés par exemple à la pollution et les changements dans l'usage du sol. La pression exercée sur le climat par les forçages anthropiques date du début de l'industrialisation. La combustion d'énergie fossile ainsi que la modification de l'utilisation des sols, et notamment la déforestation, entraînent une augmentation continue de la concentration atmosphérique des GES. Ces gaz se singularisent par leur capacité à absorber puis à réémettre l'énergie rayonnée par la surface terrestre. Ils contribuent ainsi à réchauffer l'atmosphère et la surface terrestre. Les activités humaines sont également responsables de l'émission d'autres espèces chimiques, tels que les aérosols (petites particules liquides ou solides) qui perturbent aussi le bilan

radiatif de manière significative.

Les modifications de la composition chimique de l'atmosphère sont la principale cause des changements climatiques observés et à venir. Modéliser le climat futur implique donc de faire des hypothèses sur l'évolution des émissions de GES et d'aérosols ainsi que l'évolution de l'usage des sols au cours des prochaines décennies. L'évolution future des forçages anthropiques dépend d'un ensemble de facteurs tels que la croissance démographique, le développement socio-économique, les évolutions technologiques et les choix politiques futurs. Prédire avec précision l'évolution de ces facteurs n'est pas possible, c'est pourquoi les climatologues utilisent une gamme de scénarios dont chacun correspond à une représentation plausible du comportement à venir des sociétés humaines (*section 2.2.1.1*).

Les scénarios sont utilisés en entrée de modèles globaux (*section 2.2.1.2*) dont l'objectif est de simuler l'évolution du climat à l'échelle mondiale. Pour un scénario donné, le climat simulé diffère d'un modèle à l'autre. Pour quantifier l'incertitude liée aux modèles et mieux représenter la gamme des futurs possibles, il est donc nécessaire de considérer des ensembles de projections climatiques réalisés avec une diversité de modèles. De tels ensembles ont été produits dans le cadre des exercices CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) dont l'objectif est de réaliser des simulations climatiques de façon coordonnée entre les différents groupes de recherche, permettant une meilleure estimation et compréhension des différences entre les modèles climatiques.

L'ensemble CMIP5 a été largement utilisé dans le 5^e rapport du GIEC (IPCC, 2014 : Climate Change 2014 : Synthesis Report) et au delà. Il éclaire sur les évolutions possibles de nombreux paramètres climatiques de grande échelle. En particulier, quel que soit le scénario d'émissions considéré, la hausse de la température de surface globale va se poursuivre au cours du XXI^e siècle (*tableau F1.1*). L'océan va continuer à se réchauffer, et le niveau de la mer à monter. Il est aussi très probable que les vagues de chaleur et les extrêmes de précipitations s'intensifient.

Évolution des températures	2046-2065		2081-2100	
	moyenne	intervalle	moyenne	intervalle
RCP2.6	1.0	0.4-1.6	1.0	0.3-1.7
RCP4.5	1.4	0.9-2.0	1.8	1.1-2.6
RCP6	1.3	0.8-1.8	2.2	1.4-3.1
RCP8.5	2.0	1.4-2.6	3.7	2.6-4.8

Tableau F1.1 : Évolution de la température moyenne du globe selon les projections climatiques CMIP5, moyenne et intervalle de confiance 5-95% pour les horizons temporels 2046-2065 et 2081-2100 par rapport à la période de référence 1986-2005 (source IPCC 2014 AR5).

La résolution spatiale des modèles globaux est cependant insuffisante pour bien représenter les phénomènes météorologiques locaux, en particulier certains événements extrêmes. Plusieurs méthodes existent pour affiner le diagnostic à plus fine échelle : les descentes d'échelle dynamique ou statistique.

Les méthodes de descente d'échelle dynamique consistent à utiliser des modèles de climat régionaux (*section 2.2.1.3*). Ces modèles sont très semblables aux modèles globaux par les équations qu'ils résolvent, mais ils représentent le système climatique plus finement sur une

sous-partie du globe. Cette approche a pour avantage de garantir une cohérence spatio-temporelle entre les différentes variables. L'inconvénient principal des méthodes de descente d'échelle dynamique est leur coût numérique qui oblige à faire un choix entre résolution et taille des ensembles réalisés.

Dans le cas des méthodes de descente d'échelle statistique, l'information locale ou régionale est obtenue à partir d'un modèle statistique qui relie les variables de grande échelle aux variables locales ou régionales, relation statistique établie sur les observations passées (ou des pseudo-observations). Le principal avantage de ces méthodes est leur faible coût numérique. Leurs inconvénients principaux sont l'impossibilité de vérifier la stabilité de la relation statistique dans un climat différent et la forte dépendance à la disponibilité et à la qualité des observations.

Les laboratoires français de modélisation climatique qui ont participé à l'élaboration de DRIAS-2020 (CNRM et IPSL) sont particulièrement impliqués dans la descente d'échelle dynamique – au travers de leur participation au projet CORDEX, chacun avec un modèle régional de climat (respectivement ALADIN et WRF). CORDEX vise à produire des ensembles de simulations régionales pour tous les continents, pilotées par les modèles CMIP5, pour différents scénarios et avec un cadre commun (Giorgi et al. 2009). Dans le cadre du volet européen, Euro-CORDEX (Jacob et al., 2014, 2020), plus d'une centaine de simulations de projection a été produite sur un domaine européen à 12 km de résolution horizontale et couvrant la France de manière adéquate.

Les simulations Euro-CORDEX constituent une source majeure de connaissance sur le changement climatique futur en Europe. Elles sont par ailleurs largement utilisées comme une composante des services climatiques produits par le service européen COPERNICUS C3S, des instituts nationaux ou des entreprises privées.

Leur utilisation directe reste cependant limitée dans le cadre de services climatiques et d'études d'impacts du fait des biais intrinsèques à l'utilisation des modèles. En effet, si l'on compare sur une période donnée, sur une région donnée et pour un paramètre donné, la moyenne de simulations climatiques à celle d'observations, on constate de manière

générale un assez bon accord. Cependant l'accord n'est pas parfait. Non seulement il existe des erreurs systématiques sur les moyennes, mais encore certains extrêmes sont assez mal reproduits. La mise en oeuvre de méthodes de correction de biais permet de corriger les variables du modèle, et de rendre la distribution statistique des données quotidiennes simulées identiques à la distribution observée en chaque point. Deux méthodes de corrections différentes sont développées dans les laboratoires français de recherche sur le climat contribuant à DRIAS-2020 : CDfT à l'IPSL (Vrac et al. 2012) et ADAMONT au CNRM (Déqué 2007, Verfaillie et al. 2017) (section 2.3.3).

LES SIMULATIONS RÉGIONALISÉES EURO-CORDEX

La coordination internationale entre les centres de modélisation régionale du climat s'inscrit dans le cadre du programme CORDEX, dont les principaux objectifs sont :

- mieux comprendre les phénomènes climatiques régionaux et locaux importants, leur variabilité et leur évolution grâce aux méthodes de descente d'échelle
- évaluer et améliorer les modèles et techniques de descente d'échelle climatique régionale
- produire un jeu de données de projections climatiques régionales un peu partout sur la planète
- améliorer la communication et les échanges de connaissance avec les utilisateurs des informations climatiques régionales.

La branche européenne de ce programme, Euro-CORDEX (Jacob et al., 2014, 2020), produit des simulations à la résolution 12 km sur un domaine paneuropéen (*figure F2.1*), et implique plus de 30 centres de modélisation pour une dizaine de modèles régionaux de climat différents. Parmi eux, les deux laboratoires français de modélisation du climat impliqués dans DRIAS participent, chacun avec un modèle régional, l'IPSL avec le modèle WRF, et le CNRM avec le modèle ALADIN.

Les simulations Euro-CORDEX ont été produites de 2009 à aujourd'hui, elles sont considérées comme l'état de l'art de la modélisation climatique régionale à l'heure actuelle. Elles constituent sans aucun doute le plus grand ensemble jamais réalisé avec ce type de modèle et font autorité lorsque l'on s'intéresse à une description à haute résolution de l'évolution future du climat en Europe.

Elles restent cependant soumises à un certain nombre de limitations. Ainsi, de récents travaux d'évaluation (Vautard et al. 2020) rappellent que ces simulations présentent des biais par rapport aux observations : en général, elles sont trop froides, trop humides et trop venteuses. D'autres limitations connues des RCM sont :

1. représentation des aérosols : seuls trois RCMs de l'ensemble Euro-CORDEX (RACMO, toutes les versions d'ALADIN, et HadGEM3-GA) considèrent l'évolution temporelle du forçage liés aux aérosols (Gutiérrez et al. 2020, Boé et al. 2020). Tous les autres utilisent des climatologies constantes d'aérosols,
2. représentation de l'océan : les RCM ne représentent que l'atmosphère, les



Figure F2.1 : Domaine couvert par l'ensemble Euro-CORDEX représenté par le cadre orange.

surfaces continentales et leur couplage, tandis que les caractéristiques de l'océan (température de la mer, couverture de glace) sont extraites des modèles globaux. Cela peut poser des problèmes en particulier pour la représentation des mers semi-fermées européennes (mer Méditerranée, Manche, mer du Nord, mer Baltique, mer Noire). Des modèles couplés océan-atmosphère régionaux existent dans la communauté (Ruti et al. 2016, Darmaraki et al., 2019) mais ne sont pas utilisés dans Euro-CORDEX,

3. représentation de l'usage des sols et de la végétation : l'évolution temporelle de l'usage des sols (déforestation, extension de l'emprise des villes) n'est pas prise en compte dans les RCMs Euro-CORDEX. Par ailleurs, les RCMs d'Euro-CORDEX ne prennent pas en compte la réponse de la végétation à l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂ et à l'évolution du climat (Schwingshackl et al. 2019, Boé et al. 2020).

Il est probable que les limitations décrites ci-dessus aient un impact sur la qualité des projections simulées par les modèles régionaux de l'ensemble Euro-CORDEX. Ces

limitations pourraient notamment expliquer certains désaccords constatés entre les changements simulés par les GCM d'une part, et les RCM d'autre part. Plusieurs études indépendantes ont par exemple montré que l'amplitude du réchauffement simulé par les RCMs d'Euro-CORDEX en été est systématiquement plus faible que celui des GCMs CMIP5 qui les forcent (Sorland et al. 2018, Boé et al. 2020, Schwingshackl et al. 2019). La compréhension de ce résultat fait toujours l'objet de recherche et illustre l'importance de poursuivre les travaux de recherche dans le cadre CORDEX pour continuer à développer et améliorer les modèles régionaux.

Récemment, de gros efforts ont été fournis par la communauté scientifique pour produire de nouvelles simulations Euro-CORDEX. L'ensemble disponible en 2020 inclut 55 simulations sur les périodes passée et future (scénario RCP8.5), basées sur 8 GCM forceurs issus de l'ensemble CMIP5 et 11 RCM. Au total, on compte une quarantaine de couples GCM/RCM différents. Parmi ceux-ci, 12 ont été sélectionnés dans le cadre du jeu DRIAS-2020.

LA MÉTHODE ADAMONT

La méthode ADAMONT, récemment mise au point pour les besoins des études d'impact (Verfaillie et al, 2017) a pour objectif de corriger les simulations climatiques, étape indispensable pour pouvoir comparer les résultats des projections avec le climat actuel ou passé et calculer des indicateurs climatiques basés notamment sur des seuils absolus (par exemple les températures inférieures à 0°C).

Sa mise en oeuvre nécessite de disposer d'un jeu d'observation de référence pour le climat actuel, en l'occurrence il s'agit de la base SAFRAN.

Elle s'appuie sur la comparaison au pas de temps saisonnier de climatologie observée et simulée pour chaque variable atmosphérique, établie par type de circulation générale (appelée régimes de temps).

LA BASE DE RÉFÉRENCE SAFRAN

La base de données SAFRAN est constituée de données horaires couvrant la France métropolitaine à une résolution de 8 km sur une projection Lambert-II étendue. Elle est produite par Météo-France en mode ré-analyse climatologique et est disponible depuis 1958. Une description du système SAFRAN appliqué à la France entière est décrite dans Le Moigne (2002).

La base SAFRAN utilisée pour notre interpolation est la version de 2016 intégrant la mise à jour du modèle numérique de terrain (MNT) utilisé pour définir l'altitude de chaque maille et l'ajout d'une représentation du relief permettant en montagne d'associer plusieurs altitudes à une maille donnée. Les paramètres météorologiques (température,

précipitations, humidité, vitesse du vent et rayonnement) de la base SAFRAN 2016 peuvent ainsi être légèrement différents de la version antérieure de SAFRAN, notamment en montagne.

LES RÉGIMES DE TEMPS

La méthode ADAMONT décrite dans la section suivante s'appuie sur des régimes de temps tels que définis par Vautard (1990). Ils sont obtenus par méthode de classification hiérarchique ascendante sur les champs de géopotentiel à 500 hPa (z500) après filtrage, en ne retenant que les quatre premières classes pour chaque saison hiver, printemps, été et automne.

Les régimes caractérisent pour une grande part la variabilité des conditions météorologiques observées chaque saison en France. Les structures spatiales et leurs impacts en hiver et en été sont illustrés par la suite :

Impacts des régimes d'hiver sur l'Europe :

- le régime NAO- ou Atlantic Low : correspond à un affaiblissement de l'anticyclone subtropical. C'est un régime de temps plutôt favorable aux froids modérés.
- le régime NAO+ ou Zonal : correspond à un renforcement de l'anticyclone subtropical. Le jet polaire augmente en puissance et remonte au Nord. Le flux est à l'Ouest et fait entrer largement la douceur atlantique en Europe.
- le régime Atlantic Ridge ou Dorsale Atlantique : correspond à une remontée de l'anticyclone subtropical vers le Groenland. Sur l'Europe, il rabat de l'air froid et maritime en plein flux de Nord.
- le régime Blocking Scandinave :

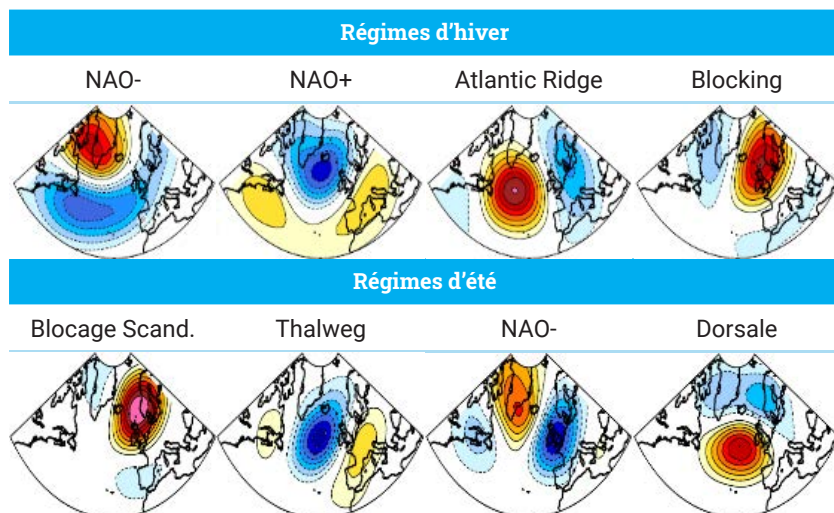
correspond à une remontée de l'anticyclone subtropical vers l'Europe du Nord l'Islande. C'est le régime de temps le plus favorable aux grands froids pour une majeure partie de l'Europe, excepté l'Europe du Nord.

LES DIFFÉRENTES ÉTAPES DE LA MÉTHODE ADAMONT :

La méthode ADAMONT (Verfaillie et al., 2017) reprend et consolide la méthode d'ajustement statistique dite quantile-

quantile (Q-Q) développée par Déqué, 2007. Cette approche de descente d'échelle et d'ajustement de biais de scénarios climatiques régionaux, utilise une méthode de correction Q-Q saisonnière par rapport à un jeu d'observations (ré-analyse SAFRAN), et prend en compte les régimes de temps sur le domaine Europe / Atlantique Nord. À la correction Q-Q au pas de temps quotidien s'ajoute une désagrégation horaire des données par une technique de recherche de journée analogue.

Elle permet d'obtenir des scénarios dé-biaisés continus au pas de temps horaire pour les variables : température, humidité, vitesse du vent, rayonnement solaire (direct et diffus) et infrarouge, pluie et neige. Elle est une des rares méthodes multivariées qui permettent de générer des séries chronologiques horaires, résolution temporelle indispensable pour les études d'impact (hydrologie ou nivologie) assurant la cohérence inter-paramètre. La prise en compte des saisons et des régimes permet également de corriger en climat futur des évolutions de la distribution des paramètres, différentes selon les périodes de l'année, ou de la circulation générales.



Impacts des régimes d'été sur l'Europe :

- le régime Blocage Scandinave : correspond à une situation où l'anticyclone se renforce sur l'Europe. En été, il s'agit d'une situation propice à la chaleur, voire à la canicule.
- le régime Thalweg Atlantique : caractérisé par un flux de secteur sud-ouest.
- le régime NAO- : correspond à un affaiblissement de l'anticyclone subtropical. Pour l'Europe, c'est un temps perturbé qui domine, souvent en flux d'Ouest.
- le régime Dorsale : correspond à un renforcement de l'anticyclone atlantique. L'Europe est dans un flux de Nord-Ouest frais et perturbé.

La méthode ADAMONT initialement appliquée sur les massifs montagneux des Alpes et des Pyrénées a été adaptée à l'ensemble de la France métropolitaine sur la grille SAFRAN 2016. Les régimes de temps ont été calculés à partir de la ré-analyse ERA Intérim sur la période 1979-2011. Pour chaque jour, les distances euclidiennes par rapport aux 4 centroïdes des classes ERA Intérim sont calculées. Le calcul des régimes en climat futur inclut une correction supplémentaire : le retrait de la tendance moyenne du champ sur lequel est effectuée l'attribution du régime (Z500 en général sauf pour le GCM MOHC-HadGEM2-ES qui ne disposait pas de cette variable, pour ce dernier les régimes de temps ont été calculés à partir des champs de pression au niveau de la mer (Pmer)).

Une comparaison entre la méthode CdfT (Vrac et al, 2010), précédemment utilisée pour la désagrégation du jeu DRIAS-2014, et la méthode ADAMONT sur deux simulations GCM/RCM a montré des écarts possibles dans l'évolution attendue des paramètres météorologiques jusqu'à +1°C sur la température et 5 % sur les précipitations sans remise en cause de structures spatiales des écarts.

BIAIS SAISONNIERS ET PAR RÉGIME DES MODÈLES RÉGIONAUX

Pour illustrer les fondements de la méthode ADAMONT, on présente dans ce paragraphe les biais sur la période de 1976-2005 par rapport à la ré-analyse SAFRAN de deux couples GCM/RCM (CNRM-ALADIN et IPSL-WRF) pour les températures et les précipitations en été et hiver pour chacun des 4 régimes (voir figure F3 ci-après).

On constate d'abord l'importance des biais des simulations régionalisés brutes qui atteignent souvent 2°C en températures et dépassent parfois 100% en cumul relatif de précipitation, d'où la nécessité de corriger ces simulations pour leur utilisation pour les services climatiques.

On constate également que ces différences ne sont pas identiques en hiver et en été mais surtout selon les régimes :

- pour les précipitations, les deux couples étudiés présentent des biais importants (sup à 100%) pour le régime blocage d'hiver, thalweg et dorsale d'été
- pour les températures, les deux couples étudiés présentent des biais importants (sup à 1,5°C) pour les régimes NAO+ et NAO- d'hiver, et thalweg d'été.

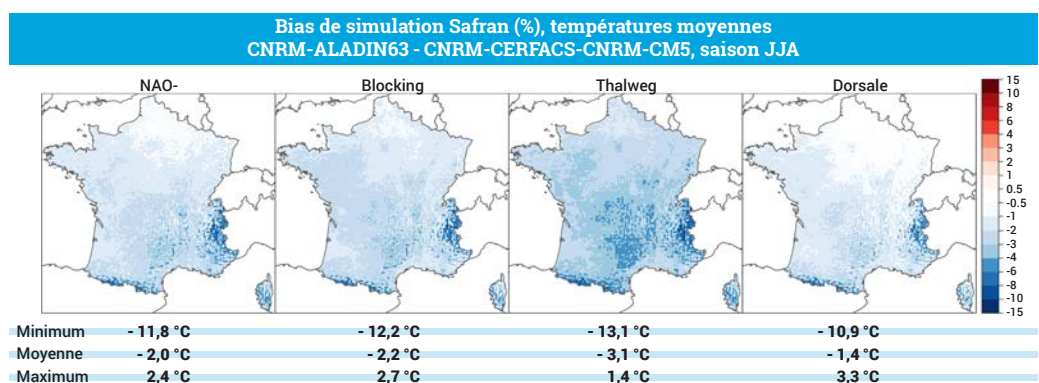
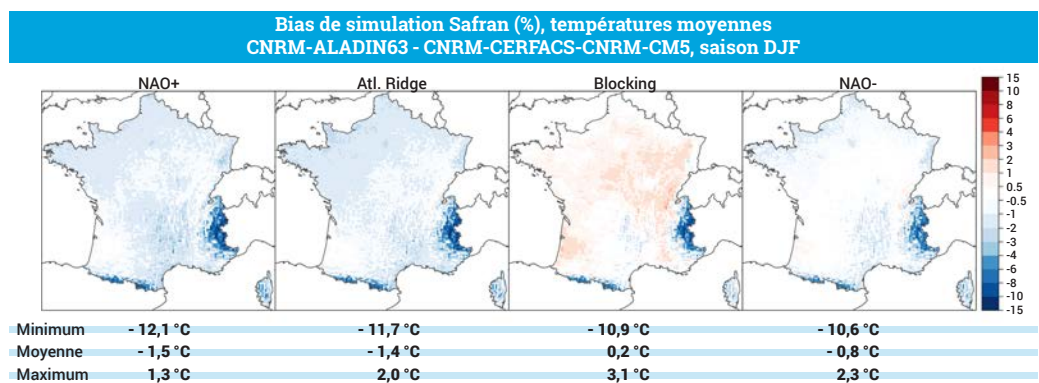
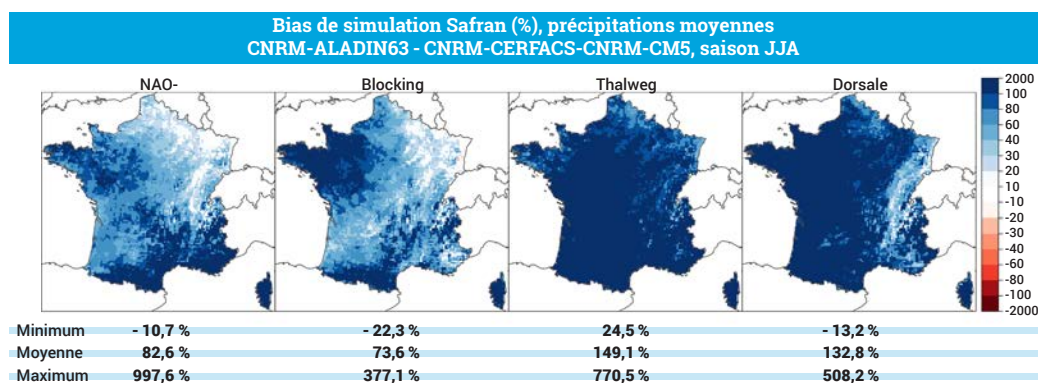
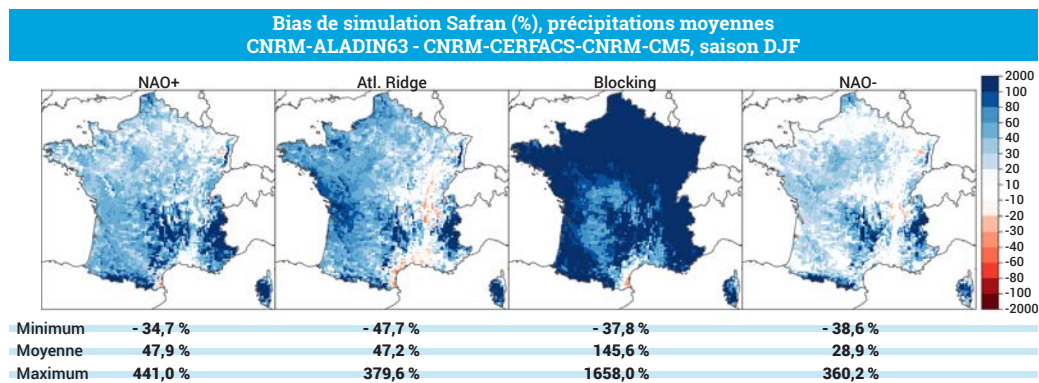
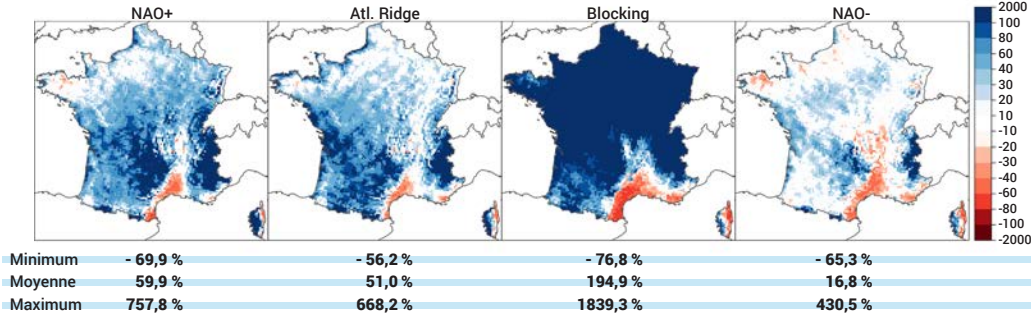
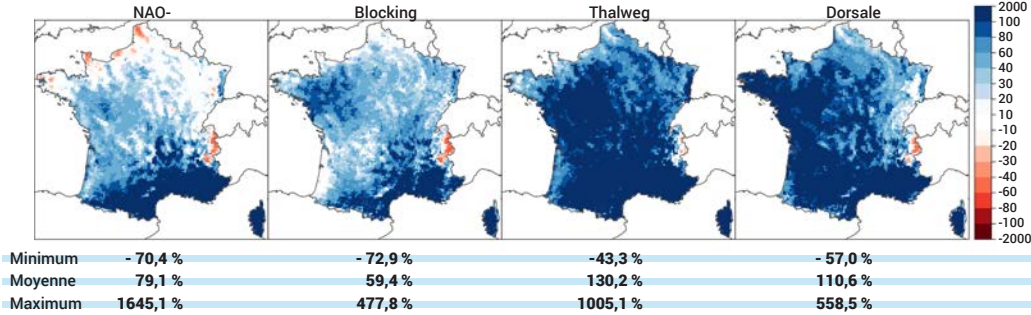


Figure F3 : Biais des simulations CNRM-Aladin et IPSL-WRF sur la période historique 1976-2005 par référence à SAFRAN pour deux paramètres (précipitation et température), deux saisons (hiver et été) et quatre régimes.

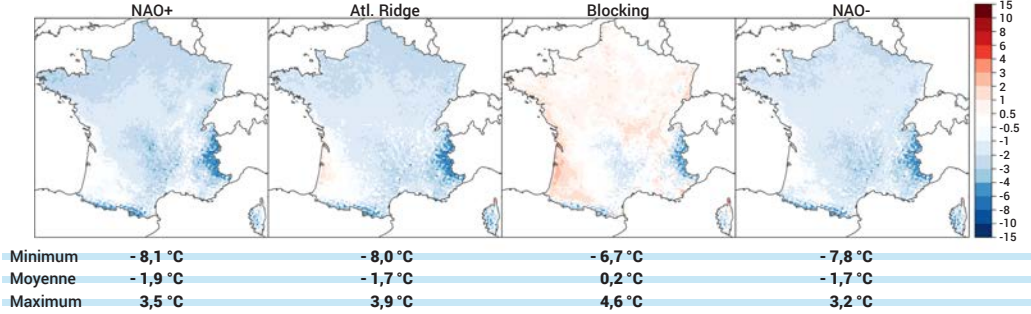
**Bias de simulation Safran (%), précipitations moyennes
IPSL-WRF381P - IPSL-IPSL-CM5A-MR, saison DJF**



**Bias de simulation Safran (%), précipitations moyennes
IPSL-WRF381P - IPSL-IPSL-CM5A-MR, saison JJA**



**Bias de simulation Safran (%), températures moyennes
IPSL-WRF381P - IPSL-IPSL-CM5A-MR, saison DJF**



**Bias de simulation Safran (%), températures moyennes
IPSL-WRF381P - IPSL-IPSL-CM5A-MR, saison JJA**

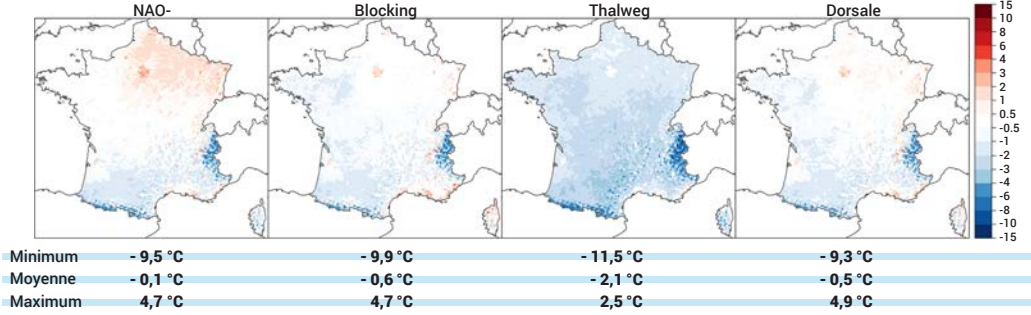


Figure F3 : suite

ÉVOLUTION DE LA CIRCULATION GÉNÉRALE DANS LE JEU DRIAS-2020

Des modifications dans la circulation générale peuvent contribuer fortement à l'évolution locale des variables climatiques en fonction de l'impact des différents régimes. Or les modèles de climat ont des biais qui peuvent dépendre de l'état de la circulation atmosphérique (Driouech et al. 2010). Par exemple, si un biais de température en surface est lié à un problème de manque de nuage dans le modèle, il sera d'autant plus fort que la circulation atmosphérique est favorable à une forte nébulosité sur la zone considérée. La méthode de débiaisage ADAMONT utilisée ici prend en compte explicitement cette dépendance des biais du modèle au régime de temps ainsi que l'évolution potentielle de la circulation générale et permet donc de la décrire précisément.

Nous présentons dans ce paragraphe les évolutions prévues des régimes pour les saisons d'hiver et d'été qui sont celles pour lesquelles les changements les plus significatifs sont attendus. Le lecteur peut se référer à l'étude de Cattiaux et al. (2013) pour l'évolution des régimes de temps dans un ensemble plus grand des GCMs CMIP5

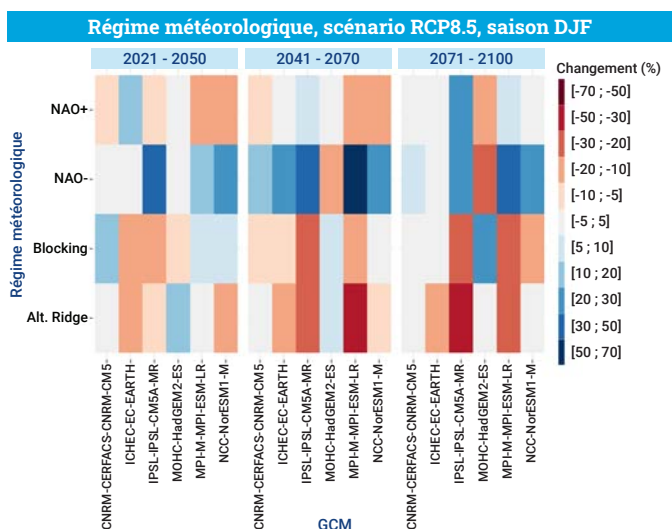
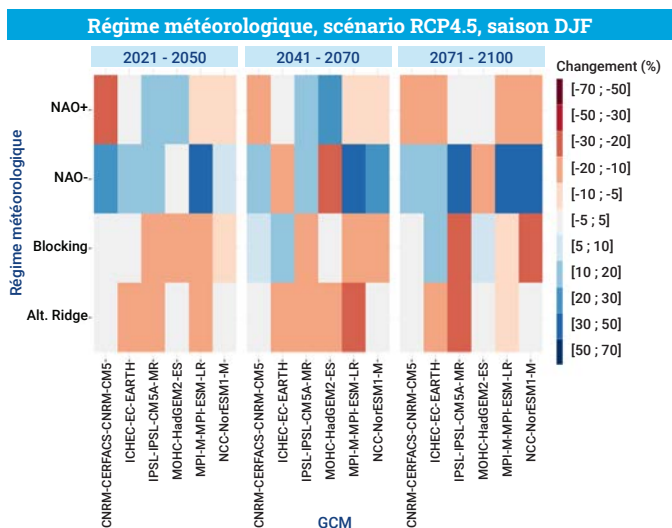
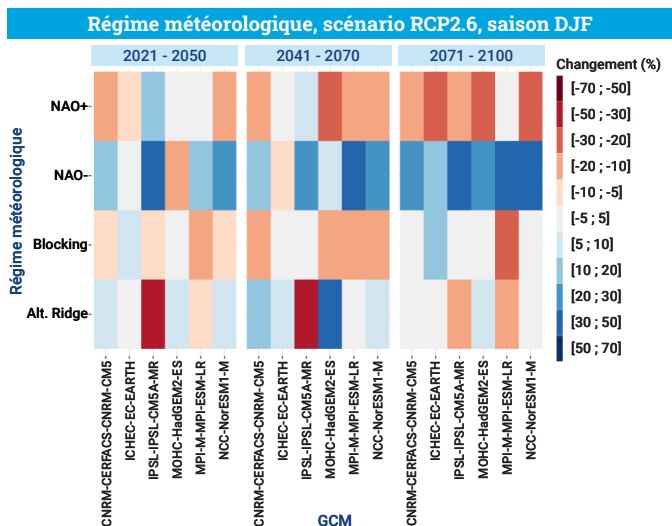
RÉGIMES D'HIVER

En saison hivernale, la circulation générale atmosphérique de chaque journée sur le domaine Europe/Nord-Atlantique peut être caractérisée à partir de quatre situations type ou régimes. Il s'agit des régimes NAO+ (phase positive de la North Atlantic Oscillation ou oscillation nord-atlantique en français), NAO-, Blocage (Blocage en français) et Atlantic Ridge (Dorsale Atlantique en Français). Les structures spatiales de ces quatre situations sont présentées dans la *fiche 3 « méthode ADAMONT »*.

Sur la période historique (1976-2005), la fréquence observée de ces régimes en hiver calculée à partir de la réanalyse Era Intérim est la suivante :

NAO+	NAO-	Blocage	Dorsale Atlantique
31,20 %	22,10 %	23,90 %	22,80 %

Selon les scénarios et les horizons (*voir les 3 figures ci-dessous F4.1*), la fréquence de ces régimes pourra évoluer assez sensiblement.



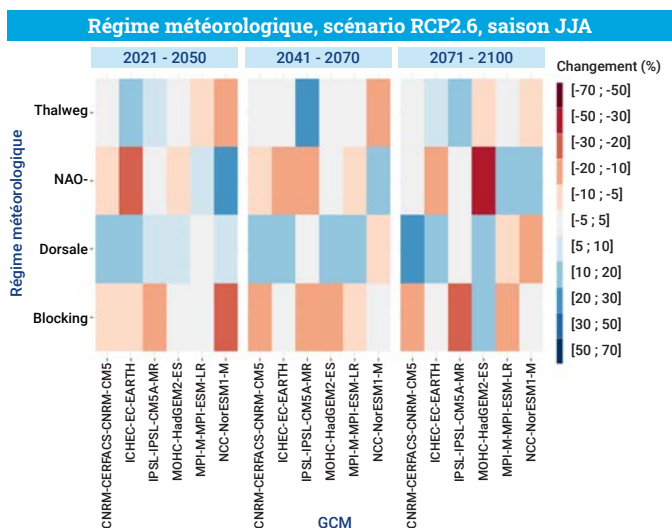
Figures F4.1 : Évolution relative de la fréquence des régimes en hiver pour les 6 GCM utilisés comme GCM forceur dans le jeu DRIAS-2020 selon les horizons temporels : haut RCP2.6, milieu RCP4.5, bas RCP8.5.

Commentaires :

■ Avec un scénario RCP2.6 : Bon accord entre les modèles en fin de siècle mais avant le signal n'est pas robuste : la plupart des modèles privilégie une diminution de la fréquence des régimes NAO+ et du régime de blocage. L'écart relatif est conséquent par rapport à la période actuelle, la médiane se situe autour de -20% pour le NAO+ et +30% pour le NAO-.

■ Avec un scénario RCP4.5 : La plupart des modèles privilégie une hausse de la fréquence du régime NAO- (5 modèles sur 6) qui augmente au cours du siècle : médiane autour de +30% en fin de siècle et une baisse faible de AR qui se retrouve aussi dans quasiment tous les modèles avec un maximum en milieu de siècle. Les évolutions des régimes Blocage et NAO+ ne sont pas très cohérentes entre les modèles ou au cours du siècle.

■ Avec un scénario RCP8.5 : Comme pour le RCP4.5, la plupart des modèles privilégie une hausse de la fréquence du régime NAO- en milieu de siècle : médiane autour de +25% et une baisse faible de AR qui se retrouve aussi dans quasiment tous les modèles avec un maximum en milieu de siècle. Les évolutions des régimes BI et NAO+ ne sont pas très cohérentes entre les modèles ou au cours du siècle (baisse majoritaire du NAO+ en début et milieu de siècle mais légère hausse en fin de siècle).

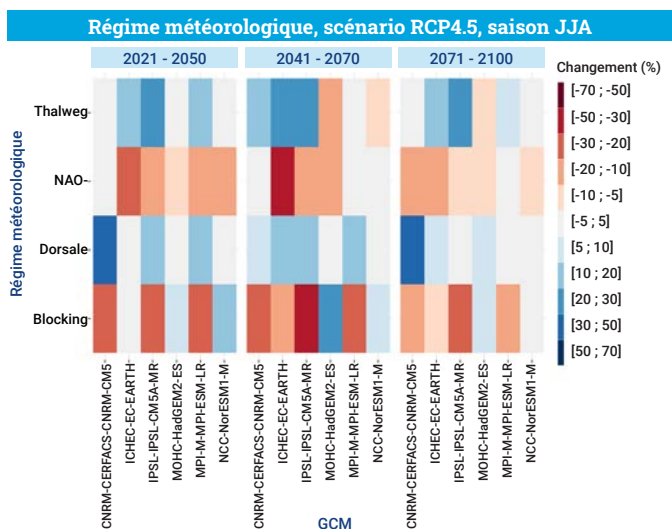


RÉGIMES D'ÉTÉ

En saison estivale, quatre situations générales quotidiennes type ou régimes prédominent sur le domaine Atlantique Nord - Europe. Il s'agit des régimes Thalweg, NAO-, Dorsale et Blocking. Les structures spatiales de ces quatre situations sont présentées dans la *fiche 3* « Méthode ADAMONT ».

Sur la période historique (1976-2005), la fréquence observée des régimes en été est la suivante :

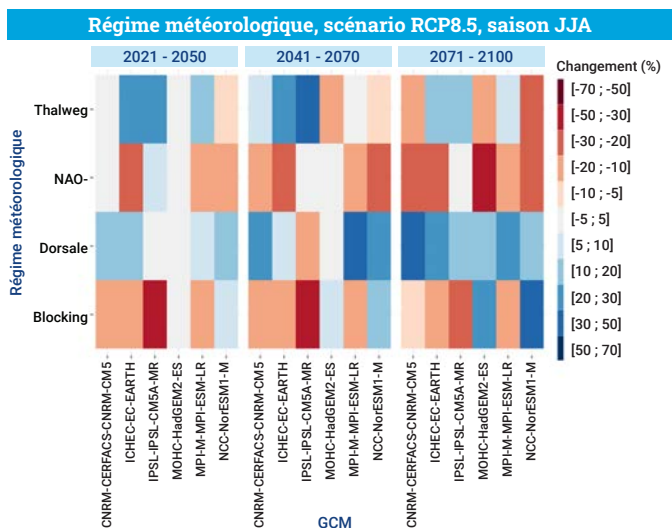
Régime	Thalweg	NAO-	Dorsale Atlantique	Blocage
Fréquence (%)	26,5	24,8	27,8	20,9



Selon les scénarios et les horizons, cette répartition des régimes évolue assez sensiblement (voir les 3 figures F4.2 ci-contre).

Commentaires :

- **Avec un scénario RCP2.6 :** Pas de consensus général mais une majorité de modèles privilégie une augmentation du régime Dorsale autour de +10% et une baisse équivalente du régime Blocage. Pas de signal clair d'évolution pour les régimes Thalweg et NAO-



- **Avec un scénario RCP4.5 :** La diminution du régime NAO- au profit du régime Dorsale est privilégiée par quasiment tous les modèles aux trois horizons avec des valeurs médianes entre -5 et -10%, respectivement +5 à +10%. Pas de consensus des modèles pour l'évolution des deux autres régimes même si la majorité des modèles donne une hausse de Thalweg et baisse de Blocage

- **Avec un scénario RCP8.5 :** La majorité des modèles privilégie une augmentation du régime Dorsale autour de +15%. Pas de consensus pour l'évolution des autres régimes sauf pour la diminution de NAO- en fin de siècle autour de -20%.

Figures F4.2 : Évolution relative de la fréquence des régimes en été pour les 6 GCM utilisés dans le jeu DRIAS selon les horizons temporels : haut RCP2.6, milieu RCP4.5, bas RCP8.5.

LES INDICATEURS DRIAS

Le calcul des indicateurs est plus ou moins complexe et nécessite en général plusieurs étapes d'agrégation, mais aussi parfois de calcul des paramètres statistiques d'une distribution.

La description quantitative des événements climatiques, que ce soit en termes de fréquence ou d'intensité, est basée sur la distribution statistique des variables atmosphériques qui les définissent. On peut ainsi s'intéresser aux valeurs moyennes, à leur dispersion autour de cette moyenne, aux valeurs extrêmes et à leur fréquence.

La distribution statistique de la variable température, suit approximativement une gaussienne. Elle est illustrée sur la *figure F5.1*, pour les conditions climatiques actuelles (courbe marron) et futures (courbe rouge), et avec une barre verticale noire

indiquant la moyenne. Ainsi si la distribution est déplacée vers des températures plus chaudes (courbe marron vers rouge), comme prévu avec le changement climatique, la valeur de la moyenne va augmenter. Cela va aussi impliquer une évolution des extrêmes de températures, avec une diminution de la fréquence des jours froids, alors que les jours chauds peuvent devenir significativement plus fréquents, comme illustré par les flèches au niveau des queues de la courbe. La largeur de la distribution peut également subir un changement, ici elle s'élargit dans le futur, contribuant à augmenter les extrêmes chauds plus fortement que la moyenne.

En ce qui concerne les précipitations, la situation est comparable à celle des températures, même si elles ne sont pas tout à fait distribuées selon une gaussienne, car leur distribution dépend fortement de la région et de l'échelle de temps considérées. Selon les régions de la planète, la distribution des précipitations en climat futur peut se décaler également vers la gauche ou vers la droite, c'est-à-dire que les précipitations connaissent une diminution ou une augmentation. En conséquence, les fréquences des faibles précipitations et des événements intenses sont également modifiées.

Probabilité des événements extrêmes

Comme on vient de le voir, les extrêmes d'une courbe de distribution représentent les extrêmes de la variable et peuvent être caractérisés sur la base du dépassement d'un certain seuil (zones colorées). Ce seuil peut être une valeur fixe pour exprimer le changement de fréquence, par exemple : le nombre de nuit tropicale, c'est-à-dire le nombre de jour où la température minimale quotidienne est supérieure à 20 °C.

Distribution statistique de la température

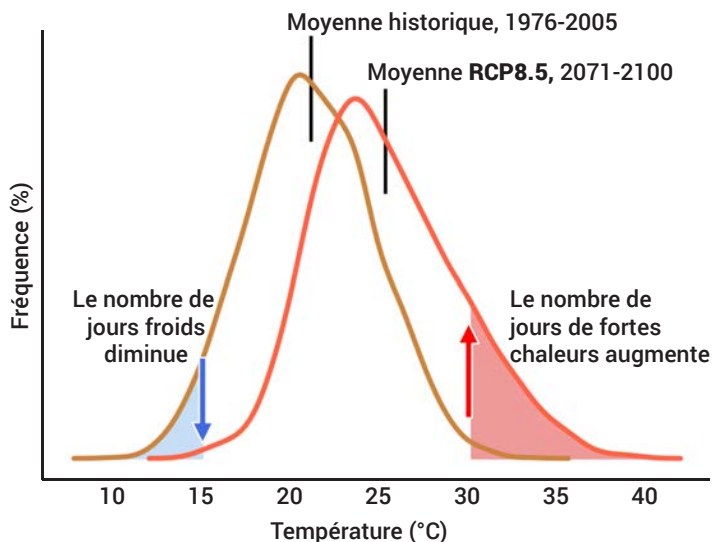


Figure F5.1 : Distributions statistiques des températures quotidiennes en conditions climatiques actuelles (marron) et futures (rouge). Les extrêmes sont définis aux extrémités de la distribution comme des événements dépassant un certain seuil (zones colorées). Un déplacement ou un changement de la distribution dans le temps, entraîne des changements dans l'occurrence des extrêmes. Les surfaces sous les courbes sont proportionnelles à la probabilité d'occurrence.

Ce seuil peut également être exprimé comme un centile de la distribution et la fréquence de dépassement de seuil correspond dans ce cas à la probabilité de l'évènement de se produire. Par exemple, le 99^e centile des précipitations annuelles est associé à la probabilité de 1 % de se produire et est utilisé pour caractériser les événements de précipitations dit extrêmes. Cet indice est très utile pour caractériser les événements extrêmes du bassin méditerranéen.

Agrégation des données

Analyser le climat et non le temps qu'il fait au quotidien, implique de filtrer la variabilité quotidienne qui est principalement chaotique. Cela signifie que l'on s'intéresse à des périodes de temps assez longues pouvant aller du mois à quelques années ou quelques décennies. De même on pourra s'intéresser au climat de la France métropolitaine dans sa globalité ou bien au climat de régions particulières.

Ainsi en fonction de ce que nous voulons analyser nous sommes amenés à procéder à des opérations d'agrégation (basée souvent sur la moyenne, mais pas seulement) temporelle et spatiale sur nos indicateurs : d'un côté nous produisons des indicateurs par horizon de 30 ans en chaque point de grille et de l'autre nous produisons des indicateurs à fréquence annuelle pour la France entière.

Ecart à la référence

Lorsque l'on s'intéresse au changement climatique et que l'on veut donc évaluer ce qui 'change', on utilise souvent des indicateurs qui représentent des écarts par rapport à un climat connu, dit de référence. Ce dernier correspondant à un climat moyen sur une période passé d'au moins 30 ans. Le choix a été fait pour le jeu DRIAS-2020 de définir ce climat de référence sur la période 1976-2005.

Ci-dessous trois exemples de calcul d'indicateurs :

- le premier « Écart de la température moyenne annuelle » représente le climat moyen
- le second « Écart relatif des précipitations extrêmes » représente les phénomènes extrêmes
- le troisième « Écart du nombre de jours de vent fort en hiver » représente la fréquence d'un phénomène

ÉCART DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE ANNUELLE :

On dispose de l'ensemble des températures minimales (T_n) et températures maximales (T_x) quotidiennes pour chaque point de grille de notre domaine complet France (grille SAFRAN).

A partir des températures moyennes quotidiennes $(T_n + T_x)/2$ on calcule la moyenne annuelle et on lui soustrait la valeur de référence annuelle (sur la période 1976-2005), on obtient ainsi une valeur par an et par point de grille

En support aux représentations de type – graphe chronologique – on construit un indicateur dit « agrégé France », en effectuant une nouvelle opération de moyenne sur l'ensemble des points de grille, on obtient un indicateur par an pour le domaine complet.

Pour étudier la répartition spatiale du champ considéré – via des représentations cartographiques – on s'intéresse généralement à un champ de type « normale climatique » (ou écart à la normale climatique), c'est à dire un champ moyenné sur 30 ans.

Pour l'obtenir, on repart de l'indicateur calculé annuellement et on le moyenne sur les 30 ans de la période considérée : on obtient une valeur par point de grille sur une période de 30 ans appelée également horizon temporel.

ÉCART RELATIF DES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES

Cet indicateur est basé sur le 99^e centile de la distribution annuelle (ie les événements de précipitations extrêmes qui se produisent avec une probabilité de 1 %) des précipitations quotidiennes. Cet indice est très utile pour caractériser les événements extrêmes du bassin méditerranéen.

Pour calculer cet indicateur on procède de la façon suivante :

On dispose de l'ensemble des cumuls quotidiens de précipitation pour chaque point de grille de notre domaine complet (grille SAFRAN).

Pour chaque année et chaque point de grille on calcule le 99^e centile de la série de 365 jours, que l'on appelle C99, on obtient ainsi une valeur par an et par point de grille.

Pour calculer l'écart relatif du C99, on calcule la moyenne des C99 sur la période de référence (1976-2005), que l'on appelle C99ref et on effectue ensuite l'opération de normalisation suivante année par année $(C99-C99ref)/C99ref$.

Cet indicateur est ensuite décliné comme le précédent, en indicateur agrégé sur la France (en support aux représentations de type graphe chronologique) et en indicateur moyenné sur 30 ans (en support aux représentations de type carte).

ÉCART DU NOMBRE DE JOURS DE VENT FORT EN HIVER

Cet indicateur est basé sur le 98^e centile de la distribution sur l'hiver (c'est-à-dire les événements qui se produisent avec une probabilité de 2 %) des vents moyens quotidiens.

Pour calculer cet indicateur on procède de la façon suivante :

On dispose de la série des vents moyens quotidiens pour chaque point de grille de notre domaine complet pour chaque saison d'hiver (décembre, janvier, février).

Pour chaque année et chaque point de grille on calcule le 98^e centile de la série de 90 jours, que l'on appelle C98, on obtient ainsi une valeur par hiver et par point de grille

On calcule ensuite le nombre de jours par hiver pendant lequel ce seuil (C98) est dépassé : on obtient une valeur NbjC98 par hiver et point de grille.

Enfin pour calculer l'écart du nombre de jours de vent fort, on calcule la moyenne des NbjC98 sur la période de référence (1976-2005), que l'on appelle NbjC98ref et on effectue ensuite l'opération suivante hiver par hiver $NbjC98-NbjC98ref$: on obtient une valeur par hiver et par point de grille.

Cet indicateur est ensuite décliné comme le précédent, en indicateur agrégé sur la France (en support aux représentations de type graphe chronologique) et en indicateur moyenné sur 30 ans (en support aux représentations de type carte).

Température minimale	Température minimale	(moyenne Tmin)	°C
	Extrême froid de la température minimale quotidienne	(=10 ^e centile des Tmin quotidien)	°C
	Extrême chaud de la température minimale quotidienne	(=90 ^e centile des Tmin quotidien)	°C
	Nombre de jours anormalement froids	(où Tmin < 5°C de la normale)	Nbr jours
	Nombre de nuits anormalement chaudes	(où Tmin > 5°C de la normale)	Nbr jours
	Nombre de jours d'une vague de froid	(où Tmin < 5°C de la normale dans une séquence > 5 j. consécutifs)	Nbr jours
	Nombre de jours de gel	(où Tmin ≤ 0°C)	Nbr jours
	Nombre de nuits tropicales	(où Tmin > 20°C)	Nbr jours
Température maximale	Température maximale	(moyenne Tmax)	°C
	Extrême chaud de la température maximale quotidienne	(= 90 ^e centile des Tmax quotidien)	°C
	Extrême froid de la température maximale quotidienne	(= 10 ^e centile des Tmax quotidien)	°C
	Nombre de jours anormalement chauds	(où Tmax > 5°C de la normale)	Nbr jours
	Nombre de jours de vague de chaleur	(Tmax > 5°C de la normale dans une séquence > 5 jours consécutifs en été)	Nbr jours
	Nombre de jours sans dégel	(où Tmax ≤ 0°C)	Nbr jours
	Nombre de journées estivales	(où Tmax > 25°C)	Nbr jours
	Amplitude thermique	(moyenne des Tmax-Tmin quotidien)	°C
Température moyenne	Nombre de jours de forte chaleur	(où Tmax > 35°C)	Nbr jours
	Température moyenne	(moyenne Tmean)	°C
	Degré-jours chauffage	(cumul des écarts négatifs au seuil de 17°C, si Tmean < 17°C)	°C
Précipitations totales	Degré-jours de climatisation	(cumul des dépassements du seuil de 18°C, si Tmean > 18°C)	°C
	Cumul des précipitations	(somme des Pr)	mm
	Précipitations quotidiennes moyennes	(moyenne Pr)	mm
	Nombre de jours de précipitations	(où Pr ≥ 1 mm)	Nbr jours
	Précipitations moyennes des jours pluvieux	(où Pr ≥ 1 mm)	mm
	Nombre de jours de fortes précipitations	(où Pr ≥ 20 mm)	Nbr jours
	Fraction des précipitations quotidiennes intenses	(où Pr ≥ 90 ^e centile des précipitations annuelles)	%
	Période de sécheresse	(Max [nombre de jours consécutifs avec Pr < 1 mm])	Nbr jours
	Maximum du nombre de jours pluvieux consécutifs	(Max [nombre de jours consécutifs avec Pr ≥ 1 mm])	Nbr jours
	Précipitations quotidiennes intenses	(90 ^e centile des précipitations annuelles)	mm
	Précipitations quotidiennes extrêmes	(90 ^e centile des précipitations annuelles)	mm
Vitesse du vent à 10 m	Nombre de jour de précipitations extrêmes	(où Pr ≥ 99 ^e centile des précipitations annuelles)	Nbr jours
	Vitesse moyenne du vent moyenne quotidien	(moyenne sfcWind)	m/s
	Cumul du nombre de jours sans vent	(où sfcWind < 15 ^e centile des sfcWind quotidien)	Nbr jours
	Vitesse du vent fort	(où sfcWind ≥ 98 ^e centile des sfcWind annuelles)	m/s
Humidité spécifique	Nombre de jours de vent fort	(où sfcWind ≥ 98 ^e centile des sfcWind annuelles)	Nbr jours
	Humidité spécifique moyenne	(moyenne huss)	kg/kg

LA COMPARAISON DES JEUX DRIAS-2020 ET DRIAS-2014

Le jeu DRIAS-2020 vient en remplacement d'un jeu équivalent produit en 2014 qui avait notamment été utilisé lors du rapport de l'ONERC de 2014 sur le climat de La France au XXI^e siècle¹. L'objet de cette fiche est de comparer les diagnostics issus de ces deux jeux de données

RAPPEL SUR LA COMPOSITION DES ENSEMBLES

Les deux ensembles DRIAS-2014 et DRIAS-2020 sont composés de simulations régionalisées issues de l'initiative EuroCORDEX à deux périodes différentes. La sélection effectuée pour le jeu DRIAS-

2020 a bénéficié de 6 années de plus et donc de plusieurs améliorations : plus de simulations, des simulations plus récentes des modèles climatiques et la réactualisation d'anciennes simulations. Certaines prennent en compte les améliorations vis à vis des anomalies détectées a posteriori (cf rapport listant ces anomalies sur l'ancien jeu), d'autres intègrent de nouvelles configurations : comme l'évolution des GES par les modèles régionaux qui fait maintenant consensus dans la communauté scientifique ou des versions améliorées de certains RCMs (ALADIN53 → ALADIN63 et WRF331F → WRF381P).

Jeu DRIAS-2014					Jeu DRIAS-2020				
GCM	RCM	RCP2,6	RCP4,5	RCP8,5	GCM	RCM	RCP2,6	RCP4,5	RCP8,5
CNRM-CM5	RCA4				CNRM-CM5	ALADIN63			
EC-EARTH	RACMO22E				CNRM-CM5	RACMO22E			
EC-EARTH	RCA4				EC-EARTH	RCA4			
EC-EARTH	HIRHAM				HadGEM2-ES	CCLM4-8-17			
HadGEM2-ES	RCA4				HadGEM2-ES	RegCM4-6			
IPSL-CM5A	RCA4				IPSL-CM5A	RCA4			
IPSL-CM5A	WRF331F				IPSL-CM5A	WRF381P			
MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17				MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17			
MPI-ESM-LR	REMO2009				MPI-ESM-LR	REMO2009			
MPI-ESM-LR	RCA4				NorESM1-M	HIRHAM v3			
		0	8	10	NorESM1-M	REMO2015			
							8	10	12

Tableaux F6.1 : Liste des projections climatiques par scénarios composant les ensembles DRIAS-2014 (en rose à gauche) et DRIAS-2020 (en bleu) à droite. Les flèches bleues indiquent les simulations qui ont été conservées entre les deux jeux de données.

1) https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/ONERC_Climat_France_XXI_Volume_4_VF.pdf

Alors que l'ancien jeu DRIAS-2014 ne disposait que des scénarios de non-atténuation : RCP8.5 et RCP4.5, la sélection DRIAS-2020 inclut également des projections pour le scénario d'atténuation RCP2.6 (voir partie 1) qui est devenu un scénario à enjeu dans la communauté Euro-CORDEX après l'accord international de Paris sur le changement climatique.

Ainsi nous passons de 18 projections climatiques (RCP8.5 : 10 et RCP4.5 : 8) pour l'ensemble DRIAS-2014 à 30 projections climatiques (RCP8.5 : 12 ; RCP4.5 : 10 et RCP2.6 : 8) pour l'ensemble DRIAS-2020 (cf tableaux F6.1). Il faut noter également une augmentation de la diversité des GCMs forceurs dans le nouveau jeu de données (6 au lieu de 5) sachant qu'ils ont été sélectionnés pour leur qualité à forcer des RCMs sur l'Europe et une augmentation de la diversité des RCMs (8 au lieu de 6). Une attention particulière a également été portée à l'équilibre entre les GCMs et entre les RCMs avec 2 simulations par GCM dans le nouveau jeu DRIAS-2020 et entre 1 et 2 simulations par RCM.

Méthodes de correction

Les simulations régionalisées Euro-CORDEX ne peuvent être utilisées directement pour des études d'impact à l'échelle locale, car elles comportent des biais systématiques qui peuvent facilement être mis en évidence sur la période historique de la modélisation. On a donc recours à des méthodes de correction de

biais statistiques qui s'appuie sur un jeu de données observées de référence pour le climat passé en France métropolitaine, en l'occurrence il s'agit de la ré-analyse SAFRAN. Les jeux de données DRIAS-2020 et DRIAS-2014 ont été corrigés par des méthodes statistiques différentes, d'une part la méthode ADAMONT (cf fiche 3) et d'autre part la méthode CDF-t dont les principales caractéristiques sont rappelées ci-dessous.

La méthode CDF-t (Michelangeli et al., 2009) mise en oeuvre par l'institut IPSL est une méthode développée pour générer les fonctions de répartition d'une variable climatique locale en climat futur à partir des fonctions de répartition de cette même variable observée ou pseudo-observée dans le climat de référence (ré-analyse SAFRAN) et estimées par les simulations climatiques pour la période historique et pour les périodes futures.

Les deux jeux DRIAS-2020 et DRIAS-2014 ont en commun 5 couples GCM/RCM (identifiés par des flèches entre les tableaux F6.1) pour la période historique et les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Ce sous-ensemble commun a permis de mener une étude spécifique sur l'impact des méthodes de correction de biais. Elle a mis en évidence quelques écarts quantitatifs entre les résultats produits par les deux méthodes mais une bonne cohérence dans les structures spatiales des évolutions en France.

ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES

Année : RCP8.5 et tous horizons

A l'échelle annuelle et aux différents horizons temporels, l'ensemble DRIAS-2020 affiche un réchauffement globalement plus important d'environ + 0,45 °C (H1 : 0,30 °C ; H2 : 0,49 °C ; H3 : 0,56 °C) que l'ensemble DRIAS-2014 par rapport à la

même période historique (1976-2005), et des maxima moins marqués sur la moyenne montagne. A noter dans le nouvel ensemble, une augmentation significative de la température sur le Massif Central en fin de siècle pour le centile 75 (structure non présente sur DRIAS- 2014).

Les conclusions sont les mêmes pour le scénario RCP4.5.

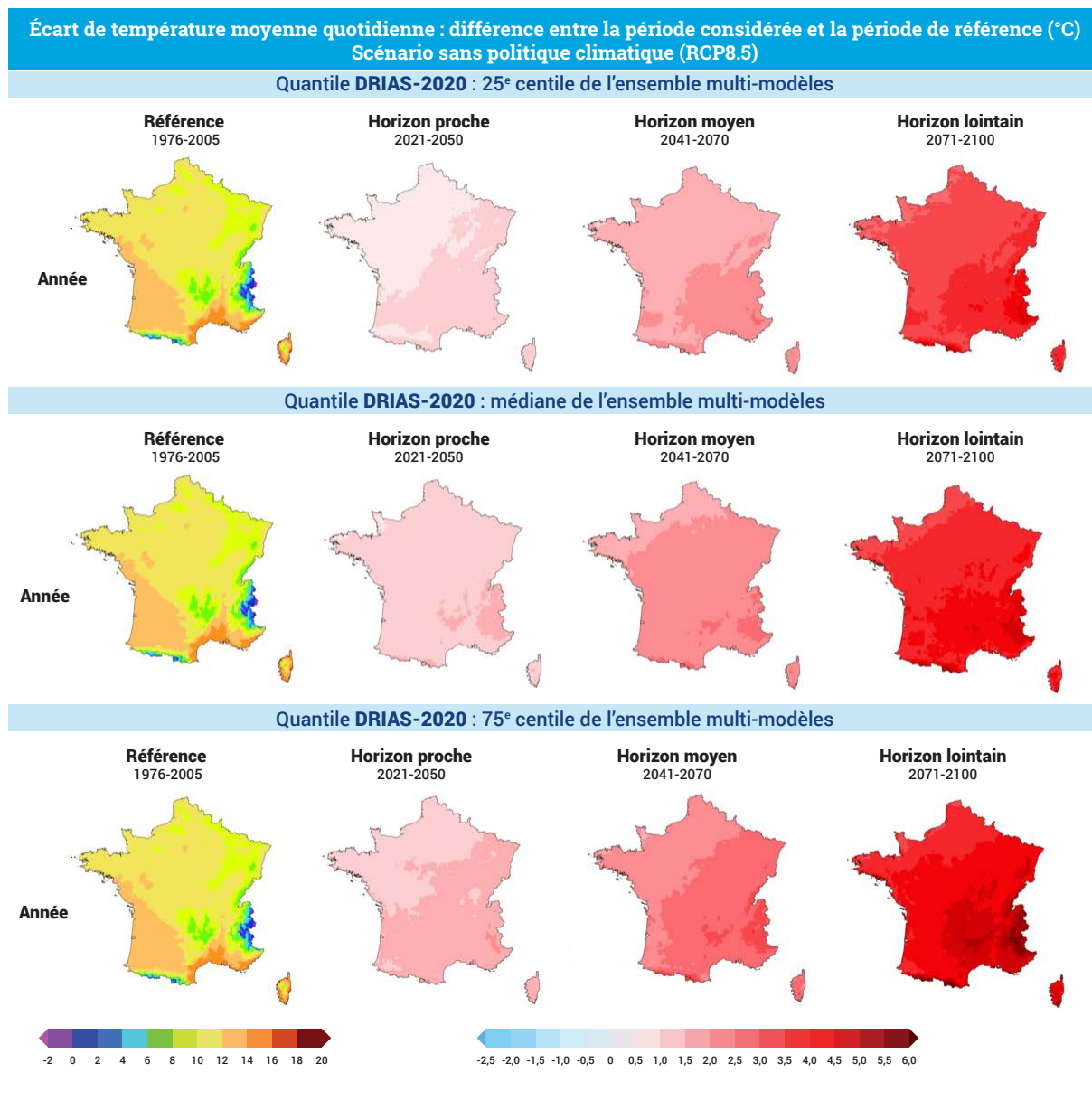
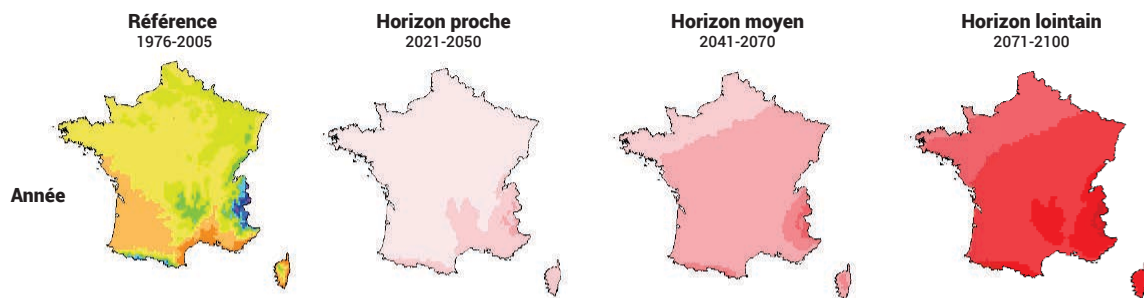


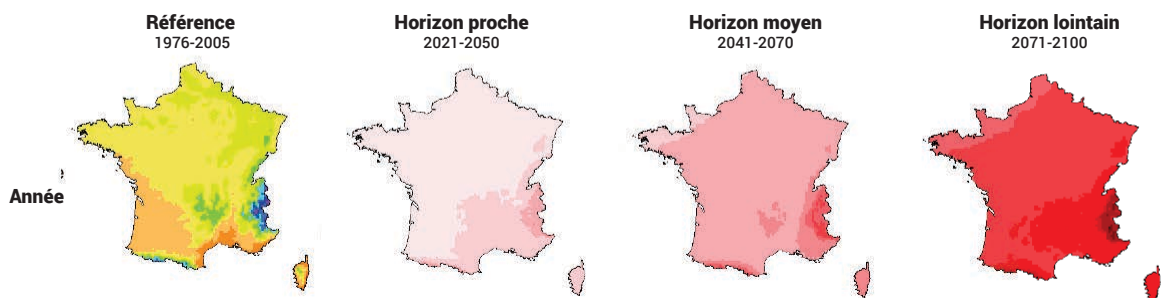
Figure F6.2 : La colonne de gauche représente la climatologie de référence (1976-2005) pour les températures annuelles. Le reste du panel de cartes correspond aux écarts de températures annuelles par rapport à la référence pour le scénario RCP8.5, en colonne les différents horizons (H1, H2, H3) et en ligne les produits de distribution de l'ensemble DRIAS-2020 (25^e, 50^e et 75^e centiles).

Écart de température moyenne quotidienne : différence entre la période considérée et la période de référence (°C)
Scénario sans politique climatique (RCP8.5)

Quantile DRIAS-2014 : 25^e centile de l'ensemble multi-modèles



Quantile DRIAS-2014 : médiane de l'ensemble multi-modèles



Quantile DRIAS-2014 : 75^e centile de l'ensemble multi-modèles

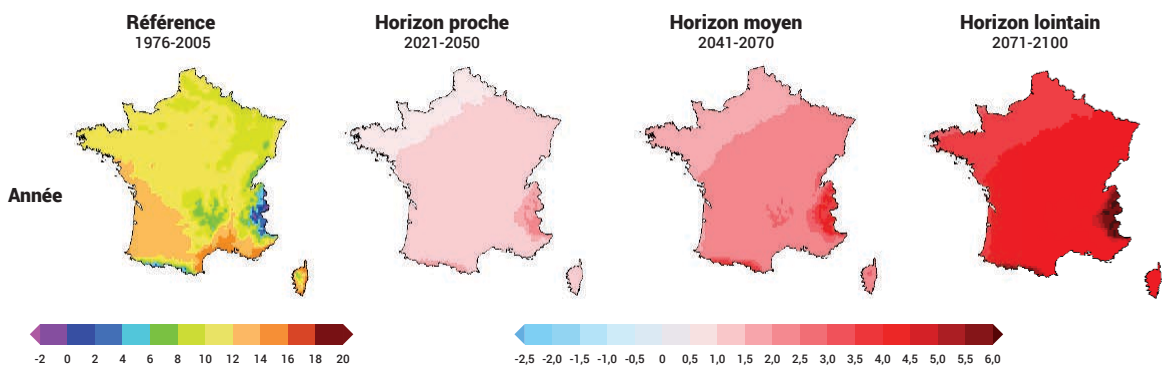


Figure F6.3 : La colonne de gauche représente la climatologie de référence (1976-2005) pour les températures annuelles. Le reste du panel de cartes correspond aux écarts de températures annuelles par rapport à la référence pour le scénario RCP8.5, en colonne les différents horizons (H1, H2, H3) et en ligne les produits de distribution de l'ensemble DRIAS-2014 (25^e, 50^e et 75^e centiles).

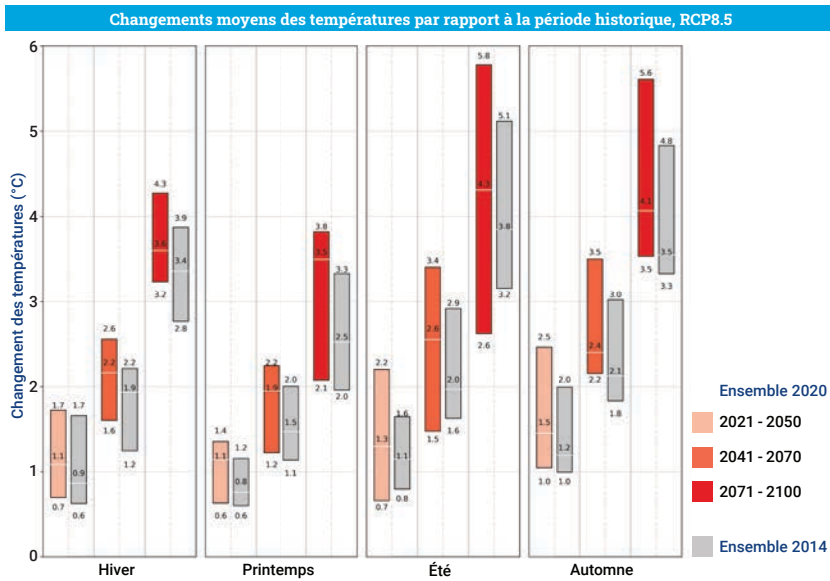
Variations saisonnières

Les figures F6.4 ci dessous montrent l'évolution saisonnière des températures par horizon temporel pour le RCP4.5 et RCP8.5 de l'ensemble DRIAS-2020 en dégradé de rouge et l'ensemble DRIAS-2014 en gris.

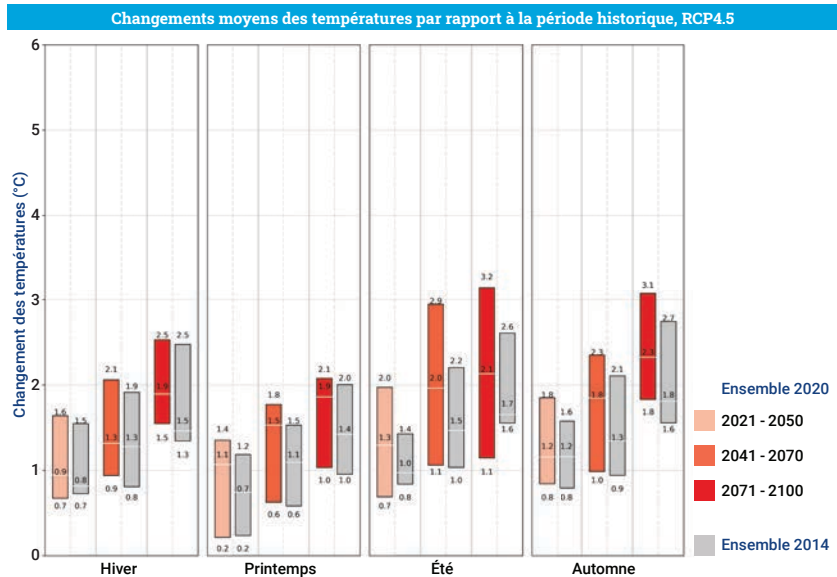
Les projections de l'ensemble DRIAS-2020 indiquent une augmentation significative des températures en toutes saisons, avec

des hausses particulièrement prononcées pour le scénario RCP8.5.

On note aussi de plus grandes plages d'incertitudes de l'ensemble, notamment pour la saison estivale. Pour l'été de DRIAS-2020 en fin du siècle, l'incertitude du scénario RCP8.5 est plus importante (+ 2,6 à + 5,8 °C pour 12 modèles) que pour DRIAS 2014 (+3,2 à + 5,1 °C pour 10 modèles).



Figures F6.4 : Représentation sous forme de boxplot des écarts des températures saisonnières des jeux DRIAS-2014 et DRIAS-2020 par rapport à la référence (1976-2005). Les boîtes représentent les 5^e et 95^e centiles et la barre blanche la médiane (en haut pour le scénario d'émission RCP8.5 et en bas pour le RCP4.5).



ÉVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS

En cumul annuel, avec le scénario RCP8.5, l'ensemble DRIAS-2020 affiche des évolutions comparables du cumul des précipitations avec des structures spatiales voisines de celles de l'ensemble DRIAS-2014, notamment le contraste nord-sud qui apparaît sur l'horizon fin de siècle. Toutefois, l'ensemble DRIAS-2020 propose

une distribution plus contrastée et ce dès le milieu du siècle (voir figures F6.5 et F6.6). A l'horizon lointain, la carte des centiles 25% montre un assèchement d'environ +14% au dessus de celui de l'ensemble DRIAS-2014, assèchement qui concerne principalement le sud de la France. Au contraire, l'augmentation des précipitations diagnostiquée essentiellement sur la partie ouest du pays avec le centile 75% de

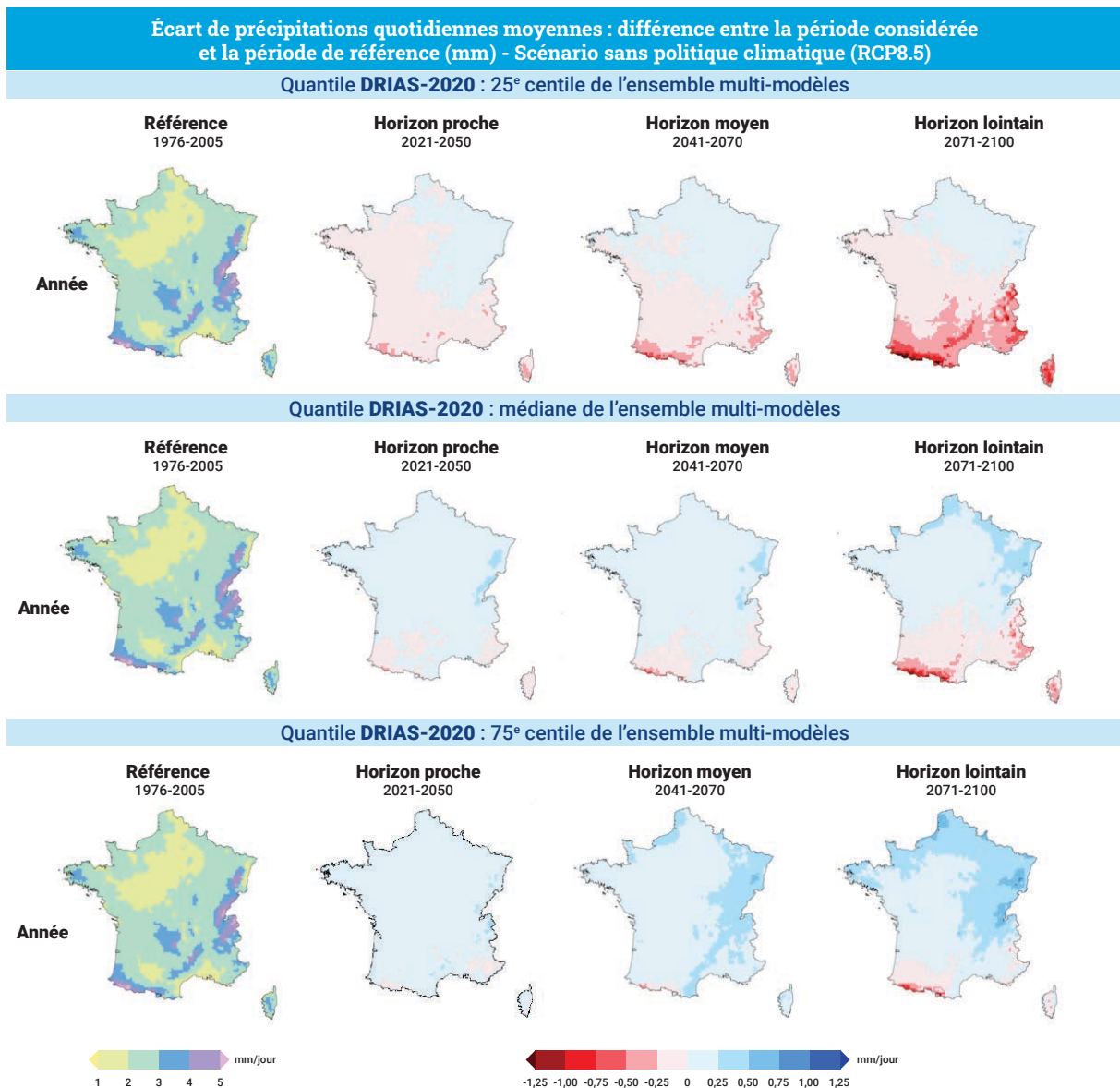


Figure F6.5 : La colonne de gauche représente la climatologie de référence (1976-2005) pour des précipitations annuelles. Le reste du panel de cartes correspond aux écarts des précipitations annuelles par rapport à la référence pour le scénario RCP8.5, en colonne les différents horizons (H1, H2, H3) et en ligne les produits de distribution de l'ensemble DRIAS-2020 (25^e, 50^e et 75^e centiles).

l'ensemble DRIAS-2020 est plus forte de 9% que celle obtenue avec l'ensemble 2014. Le même résultat se retrouve sur le scénario RCP4.5 non présenté ici...

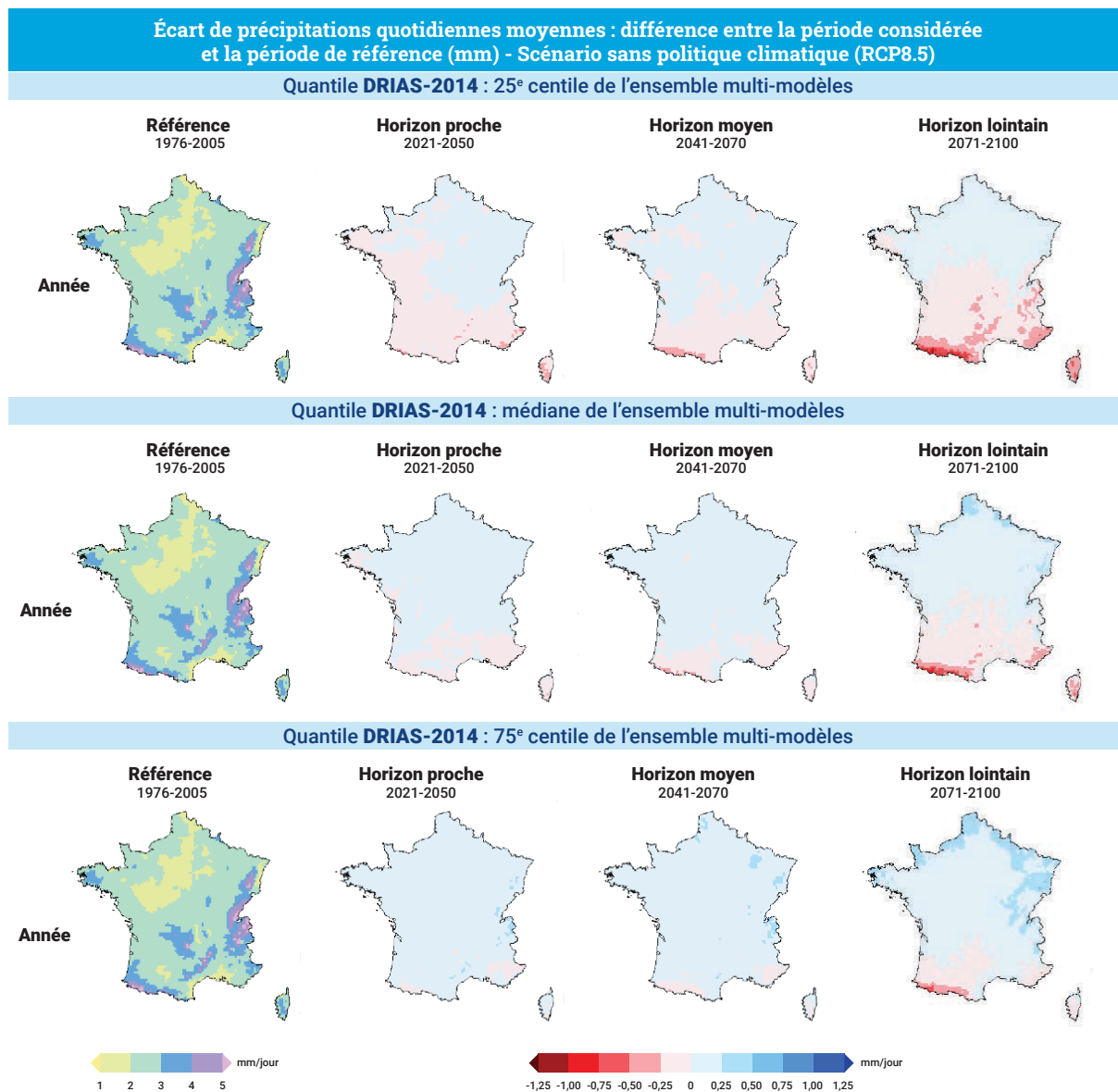


Figure F6.6 : La colonne de gauche représente la climatologie de référence (1976-2005) pour des précipitations annuelles. Le reste du panel de cartes correspond aux écarts des précipitations annuelles par rapport à la référence pour le scénario RCP8.5, en colonne les différents horizons (H1, H2, H3) et en ligne les produits de distribution de l'ensemble DRIAS-2014 (25^e, 50^e et 75^e centiles).

Variations saisonnières

Les figures F6.7 ci-dessous montrent l'évolution saisonnière des précipitations par horizon temporel pour le RCP4.5 et RCP8.5 de l'ensemble DRIAS-2020 en dégradé de bleu et l'ensemble DRIAS-2014 en gris.

Les projections de l'ensemble DRIAS-2020 indiquent une augmentation des précipitations en hiver, des conditions stables au printemps et à l'automne et une tendance à la réduction des précipitations en été. Comme pour les températures, les plages d'incertitudes de ce nouvel ensemble sont plus importantes pour la saison estivale et pour tous les horizons.

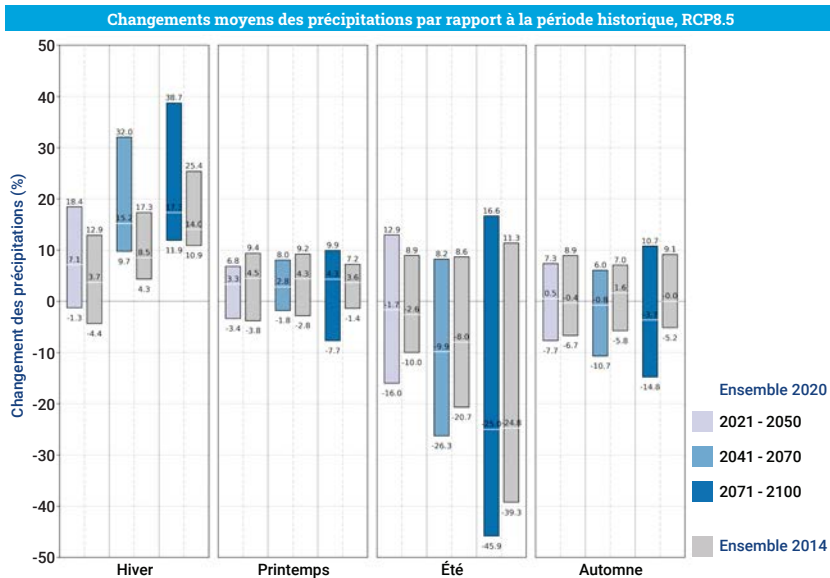
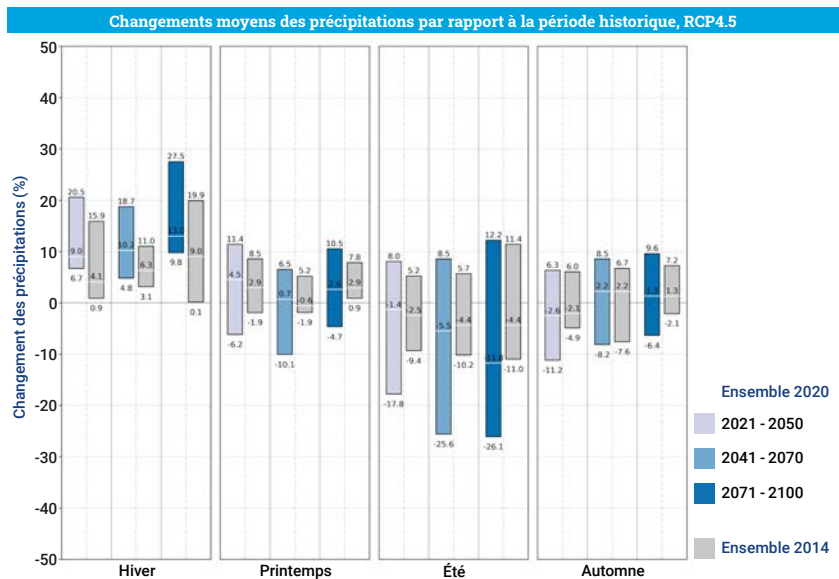


Figure F6.7 : Représentation sous forme de boxplot des écarts de précipitations saisonnières des jeux DRIAS 2014 et DRIAS 2020 par rapport à la référence (1976-2005). Les boîtes représentent les 5^e-95^e centiles et la barre blanche la médiane (en haut pour le scénario d'émission RCP8.5 et en bas pour le RCP4.5).

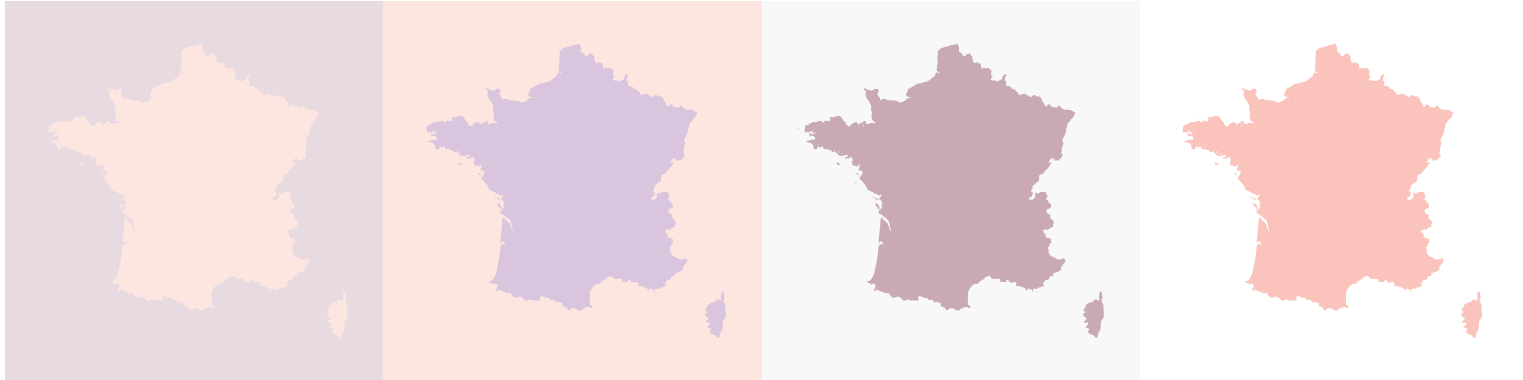


BIBLIOGRAPHIE

- Boé, J., Somot, S., Corre, L., and Nabat, P. : Large discrepancies in summer climate change over Europe as projected by global and regional climate models : causes and consequences, *Clim. Dynam.*, 54, 2981–3002, <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05153-1>, 2020.
- Cattiaux, J., H. Douville, and Y. Peings (2013), European temperatures in CMIP5 : origins of present-day biases and future uncertainties, *Climate Dynamics*, 41 (11-12), 2889–2907. doi :10.1007/s00382-013-1731-y
- Dalelane, Clementine & Früh, B. & Steger, Christian & Walter, Andreas. (2017). A Pragmatic Approach to Build a Reduced Regional Climate Projection Ensemble for Germany Using the EURO-CORDEX 8.5 Ensemble. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 57. 10.1175/JAMC-D-17-0141.1.
- Déqué, M., Rowell, D. P., Lüthi, D., Giorgi, F., Christensen, J.H., Rockel, B., Jacob, D., Kjellström, E., de Castro, M. and van den Hurk, B., 2007. An intercomparison of regional climate simulations for Europe : assessing uncertainties in model projections. *Climatic Change*, 81, 53-70
- Driouech, F, Deque, M., Sanchez-Gomez, E. (2010) Weather regimes-Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation. *Globaland Planetary Change*. 001 :10.1016/j.gloplacha.2010.03.004
- Giorgi, F., C.Jones, and G. R.Asrar, 2009 : Addressing climate information needs at the regional level : The CORDEX framework. *WMO Bull.*, 58, 175–183.
- Hawkins, E., and R. Sutton (2011), The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change, *Clim. Dyn.*, 37, 407–418, doi :10.1007/s00382-010-0810-6.
- IPCC, 2014 : Climate Change 2014 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., ... Yiou, P. (2014). EURO-CORDEX : New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14, 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- Jacob, D., Teichmann, C., Sobolowski, S. et al. Regional climate downscaling over Europe : perspectives from the EURO-CORDEX community. *Reg Environ Change* 20, 51 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01606-9>
- Jiménez-Gutiérrez E, et al. (2020) Not just the wall : the other ways to turn the yeast CWI pathway on. *Int Microbiol* 23(1) :107-119
- Le Moigne, Patrick. (2002). Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système SAFRAN.
- McSweeney, C.F., Jones, R.G., Lee, R.W. et al. Selecting CMIP5 GCMs for downscaling

over multiple regions. *Clim Dyn* 44, 3237–3260 (2015). <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2418-8>.

- P.-A. Michelangeli, M. Vrac, H. Loukos. 'Probabilistic downscaling approaches : 'Application to wind cumulative distribution functions'. *Geophysical Research Letters*, 36, L11708, doi :10.1029/2009GL038401, 2009.
- Moss, Richard & Edmonds, Jae & Hibbard, Kathy & Manning, Martin & Rose, Steven & Vuuren, Detlef & Carter, Timothy & Emori, Seita & Kainuma, Mikiko & Kram, Tom & Meehl, Gerald & Mitchell, J. & Nakicenovic, Nebojsa & Riahi, Keywan & Smith, Steven & Ronald, Stouffer & Thomson, Allison & Weyant, John & Wilbanks, Thomas. (2010). The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment. *Nature*. 463. 747-56. 10.1038/nature08823.
- A. P. Schurer, M. E. Mann, E. Hawkins, S. F. Tett, G. C. Hegerl, Importance of the pre-industrial baseline for likelihood of exceeding paris goals. *Nature climate change* 7, 563 (2017)
- Schwingshackl C., E.L. Davin, M. Hirschi, S.L. Sørland, R. Wartenburger and S. Seneviratne : Regional climate model projections underestimate future warming due to missing plant physiological CO₂ response. *Environ. Res. Lett.* 14, 114019. (2019). [https://doi.org/10.1088%2F1748-9326%2Fab4949- Sørland S.L., C. Schär, D. Lüthi and E. Kjellström : Bias patterns and climate change signals in GCM-RCM model chains. *Environ. Res. Lett.* 13, 074017. \(2018\). <https://doi.org/10.1088%2F1748-9326%2Faacc77>](https://doi.org/10.1088%2F1748-9326%2Fab4949- Sørland S.L., C. Schär, D. Lüthi and E. Kjellström : Bias patterns and climate change signals in GCM-RCM model chains. Environ. Res. Lett. 13, 074017. (2018). https://doi.org/10.1088%2F1748-9326%2Faacc77)
- Taylor, K.E., R.J. Stouffer, G.A. Meehl, An overview of CMIP5 and the experiment design, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 485-498, DOI :10.1175/BAMS-D-11-00094.1, 2012.
- Vautard, R., 1990 : Multiple weather regimes over the North Atlantic : Analysis of precursors and successors. *Monthly Weather Review*, 118, 2057-2081.
- Vautard R., 2020 : à compléter
- Verfaillie, D., Déqué, M., Morin, S., and Lafaysse, M. : The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models, *Geosci. Model Dev.*, 10, 4257–4283, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4257-2017>, 2017.
- M. Vrac, P. Drobinski, A. Merlo, M. Herrmann, C. Lavaysse, L. Li, S. Somot (2012) : Dynamical and statistical downscaling of the French Mediterranean climate : uncertainty assessment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 2769-2784, www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/12/2769/2012/, doi :10.5194/nhess-12-2769-2012)
- M. Vrac, P. Yiou (2010). 'Weather regimes designed for local precipitation modelling : Application to the Mediterranean basin'. *J. Geophys. Res. - Atmospheres*, 115, D12103, doi :10.1029/2009JD012871 (pdf). See also the associated "CCMtools" R package.



Auteurs : Jean-Michel Soubeyrou, Sébastien Bernus, Lola Corre, Agathe Drouin, Brigitte Dubuisson, Pierre Etchevers, Viviane Gouget, Patrick Josse, Maryvonne Kerdoncuff, Raphaëlle Samacoits et Flore Tocquer

Avec l'appui scientifique de Christian Pagé (CERFACS), Samuel Somot et Aurélien Ribes (CNRM) et Robert Vautard (IPSL)

