
Le climat de la France au XXI^e siècle

**Scénarios régionalisés – Édition 2014 pour la métropole
et les régions d'outre-mer**

G. Ouzeau, M. Déqué, M. Jouini, S. Planton, R. Vautard, M. Vrac

Sous la direction de Jean Jouzel

Août 2014

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE
ET DE L'ÉNERGIE



Le changement climatique en France au XXI^e siècle

Cette étude vise à fournir une analyse du changement climatique en France au XXI^e siècle à l'aide d'évolutions temporelles d'anomalies de précipitations et température en moyennes estivales et hivernales simulées par deux modèles climatiques régionaux mis en œuvre au CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques de Météo-France) et à l'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace) en collaboration avec l'INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques). Les simulations s'appuient sur trois des quatre scénarios considérés dans le dernier rapport du GIEC (2013-2014). De manière à prendre en considération les incertitudes inhérentes à la modélisation climatique, les résultats des deux modèles particuliers sont situés dans un ensemble de résultats de simulations produites au niveau international et européen.

L'ensemble des résultats est accessible sur le portail DRIAS (<http://www.drias-climat.fr/>) dans la rubrique « nouveaux scénarios (RCP) », sous plusieurs formes, d'une part des cartes interactives dans l'Espace Découverte et d'autre part des données numériques à télécharger dans l'Espace Données et Produits. Les principales variables climatiques disponibles portent sur les températures et précipitations moyennes, les indices de vague de froid, de chaleur, de sécheresse et de précipitations extrêmes.

Il s'agit dans cette étude de fournir une estimation des tendances d'évolution du climat pour le siècle à venir. Les résultats présentés ne doivent pas être interprétés comme des prévisions climatiques exactes pour des points géographiques précis. Cette étude permet néanmoins de mettre en évidence des tendances sur l'évolution des températures et précipitations en France par rapport à une période moyenne de référence 1976-2005 :

A l'horizon 2021-2050 :

- Une hausse des températures moyennes, comprise entre 0,6 °C et 1,3 °C [0,3 °C/ 2 °C]¹, toutes saisons confondues, par rapport à la moyenne de référence calculée sur la période 1976-2005, selon les scénarios et les modèles. Cette hausse devrait être plus importante dans le Sud-Est de la France en été, avec des écarts à la référence pouvant atteindre 1,5 °C à 2 °C.
- Une augmentation du nombre de jours de vagues de chaleur en été, comprise entre 0 et 5 jours sur l'ensemble du territoire, voire de 5 à 10 jours dans des régions du quart Sud-Est.

¹ Les valeurs entre crochets désignent les valeurs extrêmes des 25^e et 75^e centiles de l'ensemble multi-modèle (voir 2.3).

- Une diminution des jours anormalement froids en hiver sur l'ensemble de la France métropolitaine, entre 1 et 4 jours en moyenne, et jusqu'à 6 jours au Nord-Est du pays.
- Une légère hausse des précipitations moyennes, en été comme en hiver, comprise entre 0 et 0,42 [-0,49/+0,41] mm/jour en moyenne sur la France, avec une forte incertitude sur la distribution géographique de ce changement.
- Les deux modèles climatiques régionaux Aladin-Climat et WRF simulent de faibles changements des pourcentages de précipitations extrêmes. Cependant, ces modèles se situent dans la fourchette basse de l'ensemble multi-modèle européen.

A l'horizon 2071-2100 :

- Une forte hausse des températures moyennes. Pour le scénario RCP2.6, elle est de 0,9 °C [0,4 °C/1,4 °C] en hiver, et de 1,3 °C [0,6 °C/2 °C] en été. Pour le scénario RCP8.5, elle est comprise entre 3,4 °C et 3,6 °C [1,9 °C/3,4 °C] en hiver, et entre 2,6 °C et 5,3 °C [3,2 °C/5,1 °C] en été. Cette hausse devrait être particulièrement marquée en allant vers le Sud-Est du pays, et pourrait largement dépasser les 5 °C en été par rapport à la moyenne de référence.
- Cette hausse des températures est associée à une forte augmentation du nombre de jours de vagues de chaleur en été, qui pourrait dépasser les 20 jours pour le scénario RCP8.5 .
- La diminution des extrêmes froids se poursuit en fin de siècle. Elle est comprise entre 6 et 10 jours de moins que la référence dans le Nord-Est de la France. Cette diminution devrait être plus limitée sur l' extrême Sud du pays.
- Une hausse des précipitations hivernales, de 0,1 à 0,85 [-0,19/+0,54] mm/jour selon les modèles et les scénarios (équivalent à un excédent de 9 à 76 mm en moyenne hivernale). Pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, le modèle Aladin-Climat simule une diminution en été comprise entre -0,16 et -0,38 [-0,7/0] mm/jour en moyenne sur le territoire métropolitain (soit environ 15 à 35 mm de moins en moyenne estivale). Pour ces mêmes scénarios, le modèle WRF simule une augmentation des précipitations de 0,15 à 0,32 mm/jour. Pour le scénario RCP2.6, le modèle Aladin-Climat simule une légère augmentation des précipitations estivales de 0,05 [-0,31/+0,14] mm/jour.

-
- Un renforcement du taux de précipitations extrêmes sur une large part du territoire, dépassant 5 % dans certaines régions avec le scénarios RCP8.5, mais avec une forte variabilité des zones concernées selon le modèle.
 - Une augmentation des épisodes de sécheresse dans une large partie Sud du pays, mais pouvant s'étendre à l'ensemble du pays pour l'un des deux modèles.

Concernant les régions d'outre-mer :

Les simulations disponibles pour cette analyse sont issues uniquement du modèle Aladin-Climat, aucune estimation d'incertitude ne peut donc être fournie. Pour ce modèle, les résultats mettent en évidence sur l'ensemble des régions :

- Une augmentation de la température à l'horizon 2100 de l'ordre de 0,7 °C pour le scénario RCP2.6 et de 3 à 3,5 °C pour le scénario RCP8.5.
- Une diminution des précipitations moyennes, en particulier pour la saison sèche.

Activité cyclonique :

Cette analyse s'appuie sur l'expertise figurant dans les chapitres 11 et 14 du volume 1 du 5^e rapport du GIEC. Les résultats montrent :

- **En début de siècle** : Un faible degré de confiance est accordé à l'évaluation de l'évolution des fréquences d'occurrence des cyclones tropicaux. Quelques études seulement montrent une augmentation de l'intensité des cyclones dans le bassin Nord-Atlantique et une augmentation de la fréquence des cyclones de catégories 4 et 5 dans les bassins Nord-Atlantique et Pacifique Sud-Ouest.
- **En fin de siècle** : Il est probable que la fréquence globale des cyclones tropicaux diminuera ou restera la même. Les précipitations moyennes et la vitesse moyenne du vent maximal associées aux cyclones tropicaux augmenteront probablement.



Table des matières

1. Introduction.....	9
2. Méthodologie.....	10
2.1. Les scénarios du GIEC.....	10
2.2. Modèles utilisés et références temporelles.....	12
2.3. La prise en compte des incertitudes.....	13
3. Le changement climatique en métropole.....	15
3.1. Projections pour la température moyenne.....	16
3.2. Projections pour les précipitations moyennes.....	22
3.3. Vagues de chaleur.....	28
3.4. Extrêmes froids.....	31
3.5. Précipitations extrêmes.....	34
3.6. Périodes de sécheresse estivale.....	37
3.7. Vents violents.....	40
4. Concernant les régions d'outre-mer.....	43
4.1. Changements de température et précipitations dans les régions d'outre-mer.....	43
4.2. Impact sur l'activité cyclonique.....	46
5. Annexes.....	48
5.1. La correction des biais du modèle.....	48
5.2. La descente d'échelle.....	49
5.2.1. Variabilité climatique globale et régionale.....	49
5.2.2. Modélisation globale et régionale.....	51
5.3. Les extrêmes climatiques.....	52
5.3.1. Indices de température.....	52
5.3.2. Indices de précipitation.....	52
5.3.3. Indice de vent violent.....	53
6. Liste d'acronymes.....	54
7. Glossaire.....	54
8. Références bibliographiques.....	60
9. Références de projets.....	61



1. Introduction

A l'instar des précédents rapports (voir <http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Le-climat-de-la-France-au-XXIe-.html>), ce document répond à une demande du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, d'établir une « synthèse approfondie sur les scénarios de référence à considérer pour la mise en œuvre du plan national d'adaptation français au changement climatique », dans le cadre de la mission confiée à Jean Jouzel en juillet 2010.

Il vise à présenter les changements climatiques futurs à l'échelle de la France, simulés à partir de deux modèles climatiques régionaux mis en œuvre par le CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques de Météo-France) et l'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace) en collaboration avec l'INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques).

Contrairement aux volumes précédents (Peing et al., 2011, Peing et al., 2012), ce rapport ne rassemble pas les indices de températures, précipitations et vent de manière exhaustive, car ces derniers sont mis à disposition sur le portail DRIAS (<http://www.drias-climat.fr/>). Suite au projet GICC DRIAS, ce portail met à disposition des utilisateurs, des projections climatiques régionalisées sous différentes formes que ce soit des données corrigées (avec les observations), des indices ou encore des représentations cartographiques. Le présent document est destiné à fournir un accompagnement à l'analyse et l'interprétation de ces données.

Une autre nouveauté importante est que les scénarios climatiques de référence ne sont plus fondés sur les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre dits SRES² comme dans les précédents rapports, mais sur les nouveaux scénarios RCP³ (voir la partie 2.1), en cohérence avec le 5^e rapport d'évaluation du GIEC (GIEC, 2013).

Une fine résolution horizontale est adoptée dans les simulations, nécessaire pour la régionalisation des projections, en lien avec les processus de petite échelle liés à l'orographie notamment. Pour la première fois, des projections climatiques à résolution aussi fine ont aussi été produites pour les régions d'outre-mer.

Ce rapport propose aussi une nouvelle représentation des incertitudes autour des projections climatiques des deux modèles climatiques régionaux. On s'attache ici à prendre en compte l'incertitude liée au choix des modèles via une analyse multi-modèle (voir la partie 2.3).

Les analyses sont présentées sous forme de séries temporelles, pour les saisons hivernale et estivale, en moyenne sur la France métropolitaine dans un premier temps, pour la température et les précipitations, associées à des tableaux récapitulant les valeurs d'incertitudes liées à la modélisation climatique. Nous présentons également des cartes d'indices d'extrêmes calculés à partir des données corrigées de température et de précipitations. Dans un second temps, nous nous penchons sur le changement climatique dans les régions d'outre-mer, en terme de température et précipitations moyennes, et nous nous appuyons sur l'expertise du GIEC pour analyser l'impact du changement climatique sur l'activité cyclonique.

² Special Report on Emissions Scenarios

³ Representative Concentration Pathway

2. Méthodologie

2.1. Les scénarios du GIEC

Pour répondre aux questions posées par le changement climatique et ses impacts, le GIEC utilise les modèles du système climatique et des études économiques et démographiques, qui composent un large éventail d'évolutions possibles du climat. Les simulations climatiques sont réalisées à partir de modèles numériques appelés Modèles de Circulations Générale (MCG). Pour simuler au mieux l'évolution du climat, de nombreux forçages doivent être pris en compte, qu'ils soient naturels (éruptions volcaniques, activité solaire, ...) ou anthropiques (émissions de gaz à effet de serre, aérosols,...). Si pour le climat passé récent l'ensemble des forçages peuvent être déterminés à partir d'observations, pour les simulations du climat futur, seul les forçages anthropiques sont déterminés au travers de scénarios d'émissions.

Jusqu'au 4^e rapport d'évaluation du GIEC⁴, les projections climatiques étaient fondées sur les **scénarios SRES**, proposant plusieurs évolutions socio-économiques (A1, A2, B1, B2, A1B, ...). Ces scénarios socio-économiques consistent à faire diverses hypothèses sur le développement économique futur et ses conséquences sur l'environnement. Ils sont fournis par des modèles d'évaluation intégrée qui prennent en compte l'évolution de la population, l'économie, le développement industriel et agricole, ainsi que la chimie atmosphérique et le changement climatique. Ces modèles d'évaluation intégrée fournissent des scénarios d'évolution des gaz à effet de serre et des aérosols, qui sont introduits comme forçage dans les simulations climatiques. Cependant, ces scénarios ne prennent pas en compte l'effet des nouvelles politiques climatiques sur la réduction d'émission de gaz, et le contexte socio-économique mondial a évolué depuis la mise en place des scénarios SRES à la fin des années 1990.

Pour le 5^e rapport d'évaluation, la communauté scientifique a défini un ensemble de quatre nouveaux scénarios appelés profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP). A la différence des scénarios SRES utilisés dans le précédent rapport, et qui ont été élaborés via une démarche « séquentielle », les nouveaux **scénarios RCP** ont été créés avec une démarche parallèle qui débute par la détermination *a priori* de profils représentatifs d'évolution de concentration de gaz à effet de serre et de niveaux de **forçage radiatif** (voir encadré ci-après).

⁴ Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

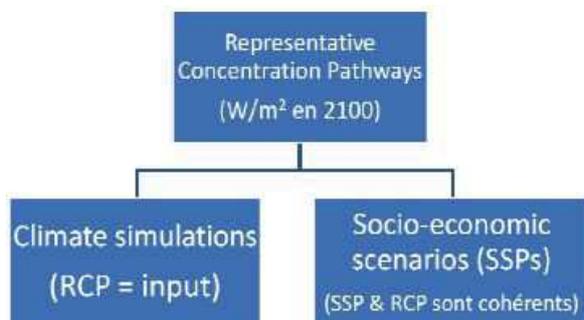


Figure 1 : Élaboration en parallèle des scénarios climatiques et socio-économiques (d'après Noorwijkherhout).

Cette mise en œuvre permet de prendre en compte les rétroactions entre les scénarios d'émission et de conditions socio-économiques, et les projections du climat, de la chimie de l'atmosphère et du cycle du carbone. À partir de ces profils de référence, les équipes travaillent simultanément et en parallèle : les climatologues produisent des projections climatiques utilisant les RCP comme entrée, tandis que les sociologues et les économistes élaborent des scénarios débouchant, en sortie, sur des émissions de gaz à effet de serre cohérents avec les RCP (Figure 1). Les différents scénarios socio-économiques sont décrits dans la

synthèse « Découvrir les nouveaux scénarios RCP et SSP utilisés par le GIEC » de l'ONERC (<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Decouvrir-les-nouveaux-scenarios,22612.html>).

Au nombre de quatre pour éviter de privilégier un scénario médian, les profils d'évolution ont été sélectionnés par les scientifiques sur la base de plusieurs centaines de scénarios publiés. Ils ont été décrits par Moss et al. (2010). Le tableau ci-dessous résume, pour chacun de ces quatre scénarios, le forçage radiatif total approximatif pour l'année 2100 par rapport à 1750, ainsi que la concentration en CO₂ correspondante (GIEC, 2013).

Scénario	Forçage radiatif vers 2100 (W/m ²)	Concentration en CO ₂ éq-CO ₂ ⁵ vers 2100 (ppm)	Profil d'évolution
RCP2.6	2,6	475	Pic puis déclin
RCP4.5	4,5	630	Stabilisation avant 2100
RCP6.0	6	800	Stabilisation après 2100
RCP8.5	8,5	1313	Croissant (sans politique climatique)

⁵ Équivalent CO₂: concentration de CO₂ qui entraînerait le même forçage radiatif qu'un mélange de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre ou d'aérosols.

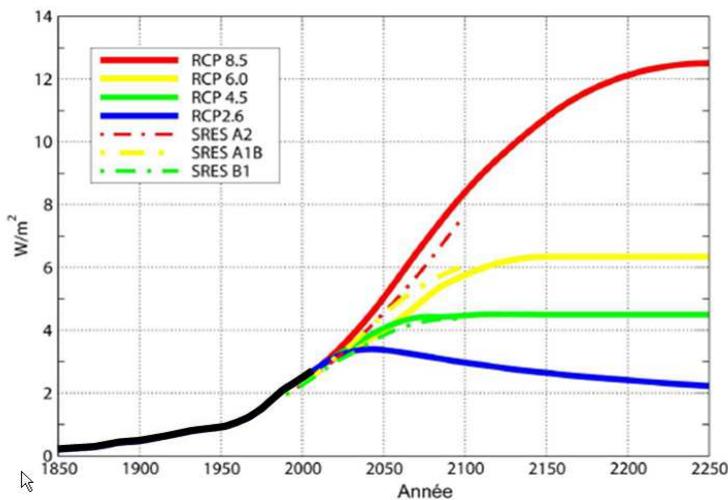


Figure 2: Evolution du forçage radiatif pour les quatre scénarios RCP et comparaison avec les scénarios SRES.

Une comparaison avec les anciens scénarios SRES (Figure 2), pour leur période commune, montre que le RCP8.5, scénario extrême, est un peu plus fort que l'ancien scénario SRES dénommé A2. Le RCP6.0 est proche du scénario SRES A1B, tandis que le RCP4.5 est proche du SRES B1. Le seul profil d'évolution sans équivalent avec les anciennes propositions du GIEC est le RCP2.6 qui intègre les effets de politiques de réduction des émissions susceptibles de limiter le réchauffement planétaire à 2 °C.

Exprimé en W/m^2 , un forçage radiatif est un changement du bilan radiatif (différence entre le rayonnement entrant et le rayonnement sortant) au sommet de la troposphère (situé entre 9 et 16 km d'altitude environ) ou de l'atmosphère, dû à un changement d'un des facteurs d'évolution du climat – comme la concentration des gaz à effet de serre.

2.2. Modèles utilisés et références temporelles

Ce rapport s'appuie sur deux **modèles régionaux** respectivement mis en œuvre par les laboratoires français du CNRM et de l'IPSL (en collaboration avec l'INERIS) : **Aladin-Climat** et **WRF**. La régionalisation des simulations climatiques globales de départ a été effectuée de façon à passer de manière continue de la résolution la plus basse utilisée pour les simulations globales des rapports du GIEC (résolution de l'ordre de 200 km) à la résolution de **12 km** des deux simulations (voir annexe pour davantage d'explications sur la méthode de régionalisation).

Les simulations **Aladin-Climat** à 12km de résolution sur la France métropolitaine ont été réalisées sur la période continue **1950-2100** pour les trois scénarios **RCP2.6, 4.5 et 8.5**. Elles ont été projetées sur une grille de **8x8 km²** de résolution, et corrigées de leurs biais à partir d'analyses de données d'observations (voir annexe pour plus de détails sur la méthode). Pour ces simulations, les conditions aux limites sont issues des simulations globales du CNRM. En dehors de la France métropolitaine, des simulations Aladin-Climat 12km de résolution ont été réalisées sur la Polynésie, la Réunion, la Nouvelle Calédonie et les Antilles. En l'absence d'analyse de données d'observations à résolution comparable, ces simulations ne sont pas corrigées. Par ailleurs, la Guyane, les Terres australes et antarctiques françaises et Saint Pierre et Miquelon ne sont pas couverts par les exercices de descente d'échelle présentés ici.

Les simulations **WRF**, disponibles sur la période **1971-2100** pour les **RCP4.5 et 8.5**, ont été corrigées à partir d'analyses de données d'observations de la même façon que les simulations Aladin-Climat. Les conditions aux limites sont issues des simulations globales de l'IPSL.

Pour cette étude, trois périodes de 30 ans sont considérées: la période de référence **1976-2005**, l'horizon « proche » **2021-2050** et l'horizon « lointain » **2071-2100**.

	Aladin-Climat	WRF
1976-2005	Référence	Référence
2021-2050	RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5	RCP4.5, RCP8.5
2071-2100	RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5	RCP4.5, RCP8.5

Afin d'avoir une estimation de l'incertitude liée à la modélisation climatique, ces deux modèles seront remplacés parmi un ensemble utilisé dans le cadre du projet de régionalisation européen **Euro-Cordex**⁶, dont les simulations régionales sont projetées sur la métropole et analysées sur la période **1971-2100**. Ces modèles régionaux sont forcés par différents modèles de circulation générale du projet **CMIP5**⁷ utilisés pour l'exercice du GIEC. Nous remercions les groupes en Europe qui ont fourni leurs simulations Euro-Cordex avant leur publication pour les besoins de ce rapport (CSC, DMI, ETH-Zürich, KNMI, SMHI, BTU)⁸.

2.3. La prise en compte des incertitudes

Les derniers travaux du GIEC (IPCC, 2013) évaluent le réchauffement global à la fin du XXI^e siècle (relativement à la référence 1986-2005) dans une fourchette probable de 0,3 à 1,7 °C pour le scénario RCP2.6, et atteignant 2,6 à 4,8 °C pour le scénario RCP8.5. Ces fourchettes de probabilité peuvent être attribuées aux incertitudes des **projections climatiques**. Parmi ces sources d'incertitude, nous pouvons citer :

- L'incertitude liée à la **variabilité climatique intrinsèque et chaotique** (ou incertitude liée à la variabilité interne), qui comprend également la problématique des conditions initiales du système climatique modélisé.
- L'incertitude liée à une **connaissance imparfaite des phénomènes** et à leur **représentation** approximative dans les **modèles** (ou incertitude liée à la modélisation). Si tous les modèles se basent globalement sur les **mêmes équations fondamentales** qui régissent les **processus physiques** et **dynamiques** du système climatique, ils diffèrent cependant par la manière dont certains de ces processus sont représentés (processus radiatifs, modélisation des nuages, chimie atmosphérique,...).

La problématique des incertitudes autour des projections climatiques est d'autant plus importante pour la régionalisation que celles-ci vont croissant au fur et à mesure que l'on descend dans la chaîne de modélisation, compte tenu des limites de précision pouvant être apportées à une résolution plus élevée. L'incertitude liée à la variabilité interne est dominante à l'échelle décennale, et constitue un axe de recherche à part entière. Dans le cadre de ce rapport, nous nous focalisons sur les projections au-delà des vingt prochaines années, en considérant des périodes de trente ans

⁶ Coordinated Regional Downscaling Experiment (Jacob et al., 2014; Vautard et al., 2013; Kotlarski et al. 2014)

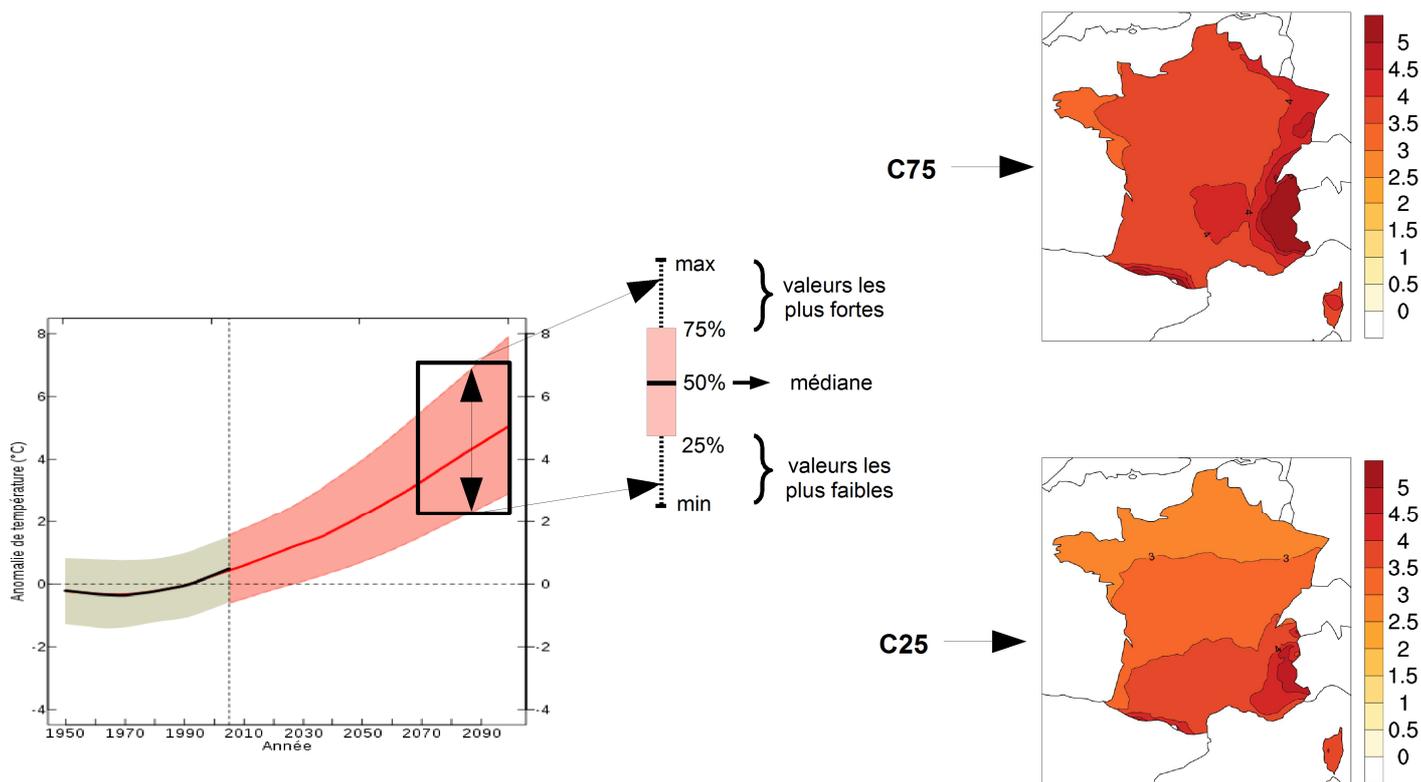
⁷ Coupled Model Intercomparison Project

⁸ <http://www.euro-cordex.net/Participants.1907.0.html>

(2021-2050 et 2071-2100). Au-delà de l'échelle décennale, l'incertitude liée à la modélisation constitue généralement la principale source, puis l'incertitude sur les scénarios devient prépondérante (Hawkins et Sutton, 2009). Nous prenons ici en compte les incertitudes des projections climatiques pour chaque scénario RCP, via une **analyse multi-modèle**. Pour ce faire, les modèles régionaux Aladin-Climat et WRF sont replacés parmi un ensemble de modèles utilisés dans le cadre des projets **CMIP5** et **Euro-Cordex**, de manière à avoir une estimation de la distribution des valeurs de températures et de précipitations simulées par les différents modèles composant les ensembles.

→ **Comment représenter cette incertitude ?**

Dans une analyse multi-modèle, lorsque l'on souhaite représenter l'évolution d'une variable au cours du temps (par exemple : température sur une ville, ou en moyenne sur la France), il est d'usage de montrer la dispersion des modèles – autrement dit l'ensemble des valeurs simulées par chacun des modèles. L'exemple ci-dessous montre une courbe d'évolution de la température en France au cours du XXI^e siècle, avec la moyenne d'un ensemble de modèles en trait plein, et la dispersion représentée par l'enveloppe rouge. Pour chaque année, nous avons l'ensemble des valeurs de température simulée par chaque modèle, et la moyenne de ces valeurs. Pour chaque année, nous pouvons donc calculer la distribution de l'ensemble de ces valeurs.



Cette distribution est schématisée par le **diagramme en boîte** (boîte à moustaches) rouge de la figure ci-dessus, qui permet de représenter la **répartition des valeurs** simulées par l'ensemble des modèles, de la valeur minimale à la valeur maximale, sous forme de « *quartiles* », cas particuliers de « *centiles* ». Ainsi, le deuxième quartile est aussi le **50^e centile** qui représente la **valeur médiane** de l'ensemble. Si par exemple, elle est située à 6 °C, cela signifie que 50 % des

valeurs de l'ensemble sont supérieures à 6 °C, et 50 % des valeurs sont inférieures à 6 °C. De la même manière, le premier quartile ou 25^e centile (que nous appellerons C25) représente la valeur en dessous de laquelle 25 % des valeurs de l'ensemble sont situées. Enfin, 25 % des valeurs de l'ensemble sont plus élevées que le troisième quartile ou 75^e centile (noté C75). Pour résumer, les valeurs se trouvant entre le minimum et le **25^e centile** font partie de la « **fourchette basse** » de la distribution de l'ensemble, et celles situées au-delà du **75^e centile** font partie de la « **fourchette haute** ». Par ailleurs, dans la suite de ce rapport, nous parlerons également des « enveloppes 5 %-95 % », qui correspondent à l'ensemble des valeurs situées entre le 5^e centile et le 95^e centile, de manière à s'affranchir des valeurs minimales et maximales extrêmes.

De la même manière qu'un tel diagramme en boîte peut être calculé pour chaque année, on peut également évaluer la distribution de l'ensemble sur une période moyenne, par exemple sur les 30 ans composant la période 2071-2100. C'est ce qui sera représenté dans la suite de ce rapport que ce soit entre crochets dans les textes résumés ou dans des colonnes des tableaux de valeurs moyennes sur la France.

Chacun de ces diagrammes peut également être calculé, non plus sur la base de valeurs moyennées sur toute la France, mais pour chacun des points de grille constituant le territoire métropolitain. Cela permet d'avoir une **cartographie de la distribution d'ensemble**. Ainsi, les cartes appelées C25 ou C75, illustrées dans la figure ci-dessus, représentent respectivement, pour chaque point de grille, la valeur du 25^e ou du 75^e centile de l'ensemble de modèles, en moyenne sur une période de 30 ans.

3. Le changement climatique en métropole

Cette partie est destinée à évaluer dans un premier temps l'évolution au cours du XXI^e siècle des anomalies (écarts par rapport à la référence 1976-2005) de température et de précipitations en moyenne sur la France, simulées par nos deux modèles, et replacées parmi un éventail d'évolutions possibles simulées par un ensemble de modèles globaux issus du projet CMIP5, pour les saisons estivale et hivernale. Afin d'évaluer la répartition spatiale de ces changements, l'analyse s'appuie également sur des cartographies d'anomalies de température et précipitations, en moyenne sur les périodes 2021-2050 et 2071-2100, pour chaque scénario. Nous situons cette fois-ci les résultats issus de nos deux modèles parmi un ensemble de simulations régionales Euro-Cordex, et non plus un ensemble de modèles globaux, afin de tirer profit de la régionalisation. Pour ce faire, nous utilisons les 25^e (C25) et 75^e (C75) centiles de l'ensemble, qui correspondent respectivement aux estimations « basses » et « hautes » issues des modèles de l'ensemble (voir partie 2.3). Nous nous focalisons ensuite sur l'étude des vagues de chaleur, extrêmes froids, précipitations extrêmes et périodes de sécheresse, dont la méthode de calcul est détaillée en annexe. Il s'agit d'une sélection d'indices pertinents pour l'analyse du changement climatique en France, mais le lecteur pourra découvrir davantage d'indices sur le portail DRIAS (<http://www.drias-climat.fr/decouverte>).

3.1. Projections pour la température moyenne

La figure 3 montre l'évolution de la température moyennée sur la France (écart par rapport à la référence 1976-2005), pour les saisons hivernale (graphique de gauche) et estivale (graphique de droite), pour les trois scénarios RCP. Les diagrammes en boîte à droite des graphiques donnent la distribution des températures simulées par l'ensemble des modèles, en moyenne à l'horizon 2071-2100. Les enveloppes colorées donnent la dispersion des modèles issus de l'ensemble CMIP5 (voir définitions en partie 2.3). La courbe noire représente la moyenne d'ensemble des simulations « historiques » de CMIP5 (1950 à 2005).

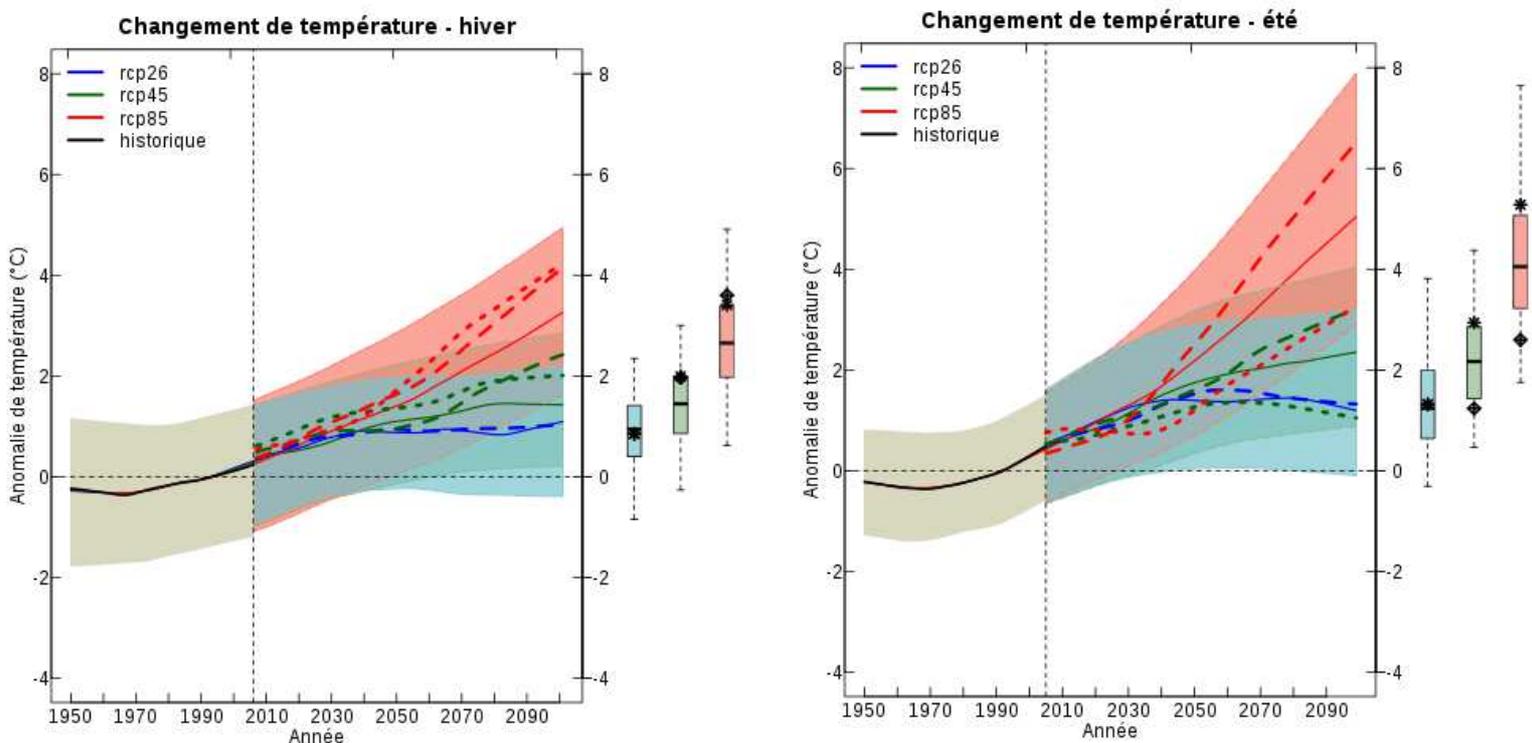


Figure 3: Evolution de la température en moyenne sur la France (°C) en hiver (à gauche) et en été (à droite), relativement à la référence 1976-2005. Les moyennes d'ensemble de chaque scénario RCP (lignes continues, RCP2.6 en bleu, RCP4.5 en vert et RCP8.5 en rouge) sont accompagnées de leurs dispersions (enveloppes colorées correspondant à l'intervalle 5 %-95 % de l'ensemble). La courbe noire représente la moyenne d'ensemble des simulations « historiques » de CMIP5 (de 1950 à 2005), et l'enveloppe colorée associée la dispersion de cet ensemble. Les lignes discontinues et pointillées correspondent aux évolutions respectives pour les simulations Aladin-Climat et WRF. Les diagrammes en boîte donnent les distributions moyennes sur la période 2071-2100 (minimum, 25^e centile, 50^e centile, 75^e centile et maximum), et sont accompagnés des moyennes 2071-2100 pour le modèle corrigé Aladin-Climat (astérisques noirs) et le modèle corrigé WRF (losanges noirs).

- En hiver :

Au début du XXI^e siècle, le changement de température est similaire quels que soient le modèle et le scénario utilisés, et atteint **1 à 2 °C** pour nos deux modèles à la fin des années 2050.

A partir de la seconde moitié du XXI^e siècle, l'écart de température simulé par les modèles Aladin-Climat et WRF est généralement supérieur à la moyenne de l'ensemble CMIP5, à part pour le scénario RCP2.6. C'est à l'horizon **2071-2100** que les différences entre les scénarios deviennent les plus importantes, avec une température atteignant environ **0,9 à 3,6 °C** de plus que la moyenne de référence pour nos modèles selon les scénarios. A noter que WRF et Aladin-Climat se situent dans la « fourchette haute » de l'ensemble CMIP5 (en particulier pour les RCP8.5 et 4.5), dont l'anomalie moyenne de température sur la période 2071-2100 est comprise entre 0,4 et 1,4 °C pour le scénario RCP2.6, et entre 1,9 et 3,4 °C pour le scénario RCP8.5.

- En été :

Pendant la saison estivale, l'incertitude autour de l'évolution de la température est plus marquée, en particulier après la seconde partie du XXI^e siècle. Cette incertitude est liée non seulement à un écart plus important entre les trois scénarios RCP, mais également à une dispersion plus élevée parmi l'ensemble des modèles globaux CMIP5, en particulier pour le scénario RCP8.5.

Si le modèle **WRF** simule une augmentation de température relativement faible (de **1,2 °C à 2,6 °C** selon les scénarios sur la période **2071-2100**, ce qui le place dans la « fourchette basse » de l'ensemble CMIP5), **Aladin-Climat** simule de **1,3 °C à 5,3 °C** d'augmentation en moyenne sur la période 2071-2100.

Le tableau suivant résume les écarts de température par rapport à la moyenne de référence 1976-2005, pour chacun des modèles et scénarios, en moyenne aux horizons 2021-2050 et 2071-2100.

TEMPERATURE		C25	WRF	Aladin-Climat	C75
HIVER					
2021-2050	RCP 2.6	+0,4 °C	Indisponible	+0,6 °C	+1,3 °C
	RCP 4.5	+0,3 °C	+1,3 °C	+0,8 °C	+1,4 °C
	RCP 8.5	+0,5 °C	+0,8 °C	+1 °C	+1,6 °C
2071-2100	RCP 2.6	+0,4 °C	Indisponible	+0,9 °C	+1,4 °C
	RCP 4.5	+0,8 °C	+2 °C	+2 °C	+2 °C
	RCP 8.5	+1,9 °C	+3,6 °C	+3,4 °C	+3,4 °C
ETE					
2021-2050	RCP 2.6	+0,7 °C	Indisponible	+1,2 °C	+2 °C
	RCP 4.5	+0,6 °C	+1 °C	+1,3 °C	+1,9 °C
	RCP 8.5	+0,9 °C	+0,6 °C	+1,2 °C	+2 °C
2071-2100	RCP 2.6	+0,6 °C	Indisponible	+1,3 °C	+2 °C
	RCP 4.5	+1,4 °C	+1,2 °C	+2,9 °C	+2,9 °C
	RCP 8.5	+3,2 °C	+2,6 °C	+5,3 °C	+5,1 °C

Afin d'évaluer spatialement le réchauffement sur la France métropolitaine, les figures suivantes montrent les cartes de changement de température (écarts par rapport à la référence 1976-2005), en moyenne aux horizons 2021-2050 et 2071-2100. Chaque figure présente le réchauffement pour un scénario et une saison (hivernale ou estivale). Les deux modèles WRF et Aladin-Climat (colonnes du milieu) sont replacés parmi les 25^e (C25) et 75^e (C75) centiles de l'ensemble de modèles régionaux Euro-Cordex (colonnes de gauche et droite).

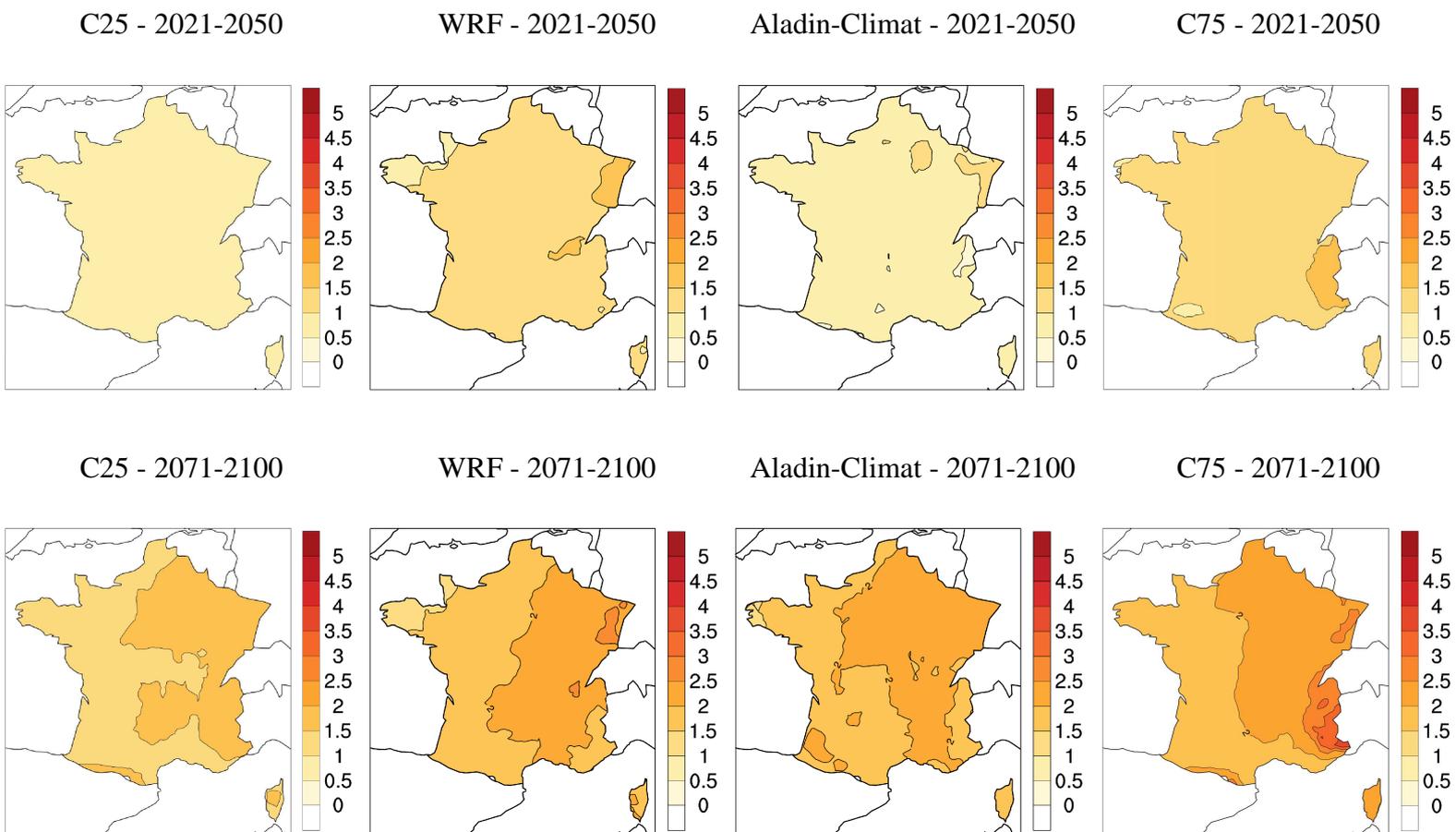


Figure 4: Écarts de température hivernale (°C) en France relativement à la référence 1976-2005, pour le scénario RCP4.5, aux horizons 2021-2050 (ligne du haut) et 2071-2100 (ligne du bas). Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25^e centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75^e centile de l'ensemble.

- En hiver :
- RCP4.5 (figure 4) :

Les résultats mettent en évidence pour les deux simulations une **augmentation de la température moyenne hivernale** au cours des prochaines décennies sur le territoire métropolitain, et ce de manière croissante pour les deux horizons considérés. L'augmentation moyenne pour l'**horizon proche** est comprise entre **0,5 et 1,5 °C** sur l'ensemble du territoire, voire jusqu'à **2 °C** à

l'Est/Nord-Est du pays. On retrouve Aladin-Climat se situant dans la fourchette basse des simulations de l'ensemble Euro-Cordex (valeurs proches de C25), et WRF près des valeurs les plus élevées de l'ensemble (C75). En ce qui concerne la **fin du siècle**, les résultats présentent une augmentation moyenne hivernale comprise **entre 1 et 2 °C** pour les régions d'influence **Atlantique** et **Méditerranéenne**, et entre **2 et 3 °C** pour les territoires plus **continentaux**. Ces résultats sont relativement cohérents entre les modèles WRF et Aladin-Climat, qui se placent parmi les plus fortes valeurs de l'ensemble Euro-Cordex.

– RCP8.5 (figure 5) :

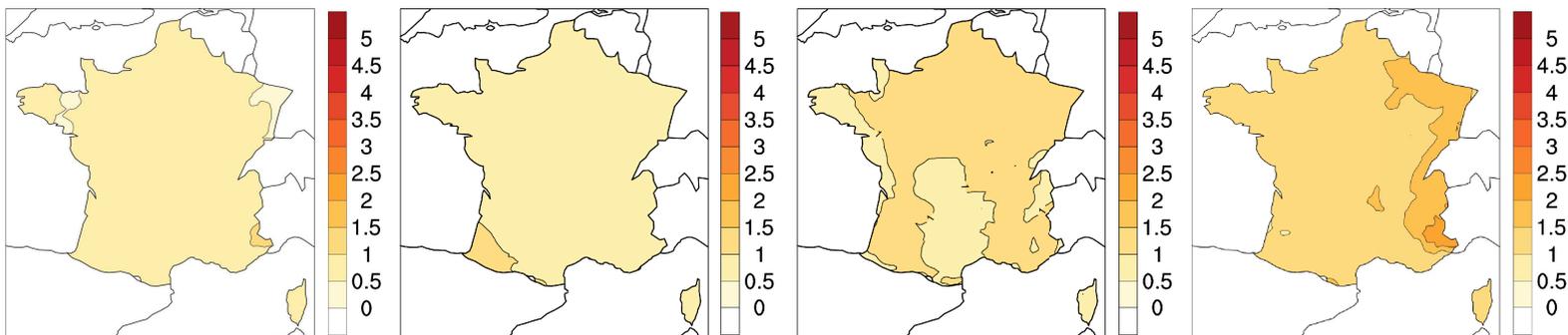
Comme pour le scénario RCP4.5, l'augmentation moyenne de température à l'horizon **2021-2050** est comprise **entre 0,5 et 1,5 °C** sur l'ensemble du territoire pour les modèles WRF et Aladin-Climat, qui se situent en deçà du C75 de l'ensemble (qui montre un réchauffement allant jusqu'à 2 °C voire localement 2,5 °C). Cette augmentation de la température moyenne hivernale est encore plus marquée à l'horizon **2071-2100**, avec un réchauffement compris **entre 2,5 et 4 °C** pour les modèles WRF et Aladin-Climat. Si la répartition géographique du réchauffement diffère selon le modèle, les résultats montrent de manière générale un réchauffement **croissant suivant un axe Nord-Ouest/Sud-Est**.

C25 - 2021-2050

WRF - 2021-2050

Aladin-Climat - 2021-2050

C75 - 2021-2050



C25 - 2071-2100

WRF - 2071-2100

Aladin-Climat - 2071-2100

C75 - 2071-2100

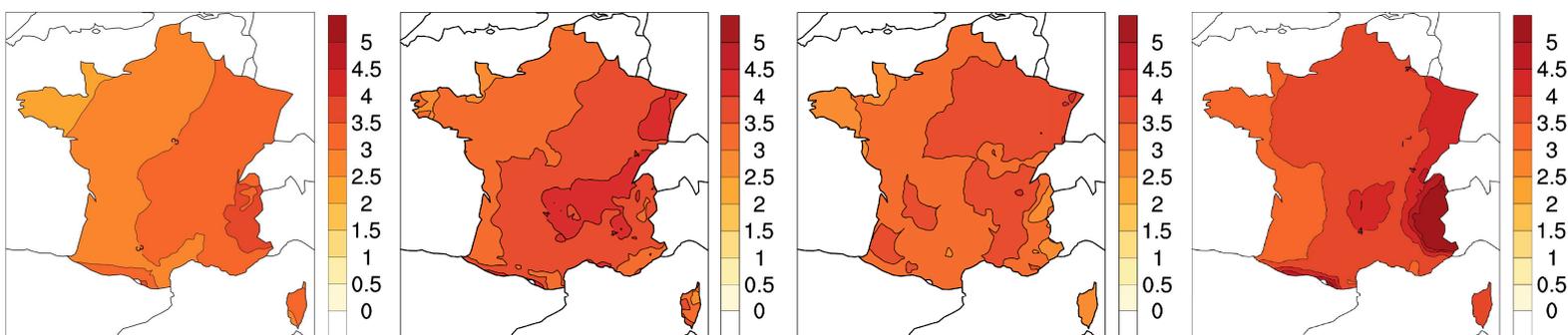


Figure 5: Écart de température hivernale (°C) en France relativement à la référence 1976-2005, pour le scénario RCP8.5, aux horizons 2021-2050 et 2071-2100. Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25^e centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75^e centile de l'ensemble.

- En été :

- RCP4.5 (figure 6) :

A l'horizon **2021-2050**, les modèles WRF et Aladin-Climat simulent une augmentation de la température moyenne estivale comprise **entre 0,5 et 2 °C** sur l'ensemble du territoire. Si cette augmentation semble un peu plus élevée globalement pour Aladin-Climat, les deux modèles s'accordent sur un réchauffement plus marqué pour les **régions d'influence méditerranéenne**, de manière cohérente avec l'ensemble des simulations Euro-Cordex.

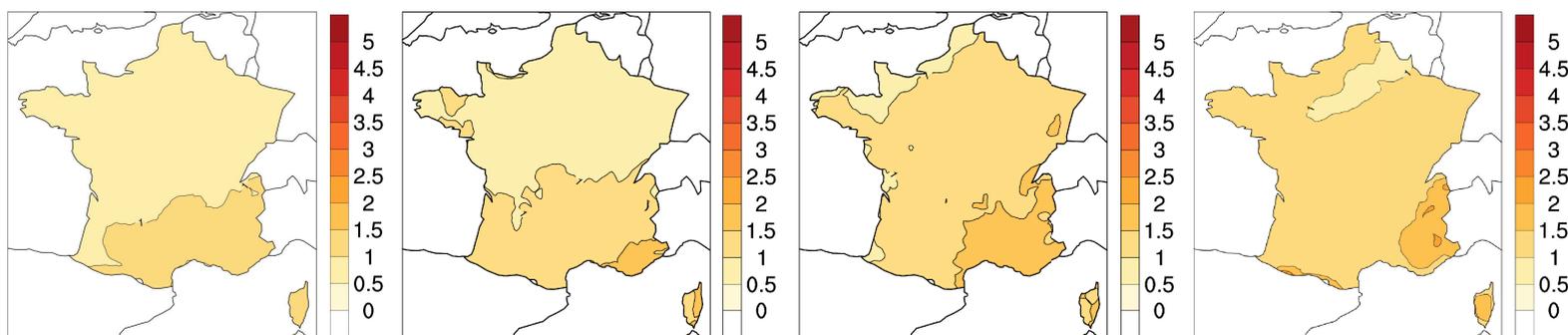
L'augmentation moyenne à la **fin du XXI^e siècle** est à **peine plus importante** qu'en première moitié de siècle, mis à part pour Aladin-Climat, pour lequel le réchauffement va jusqu'à 3,5 °C à l'Est du pays, ce qui le place au-dessus du 75^e centile de l'ensemble Euro-Cordex.

C25 - 2021-2050

WRF - 2021-2050

Aladin-Climat - 2021-2050

C75 - 2021-2050



C25 - 2071-2100

WRF - 2071-2100

Aladin-Climat - 2071-2100

C75 - 2071-2100

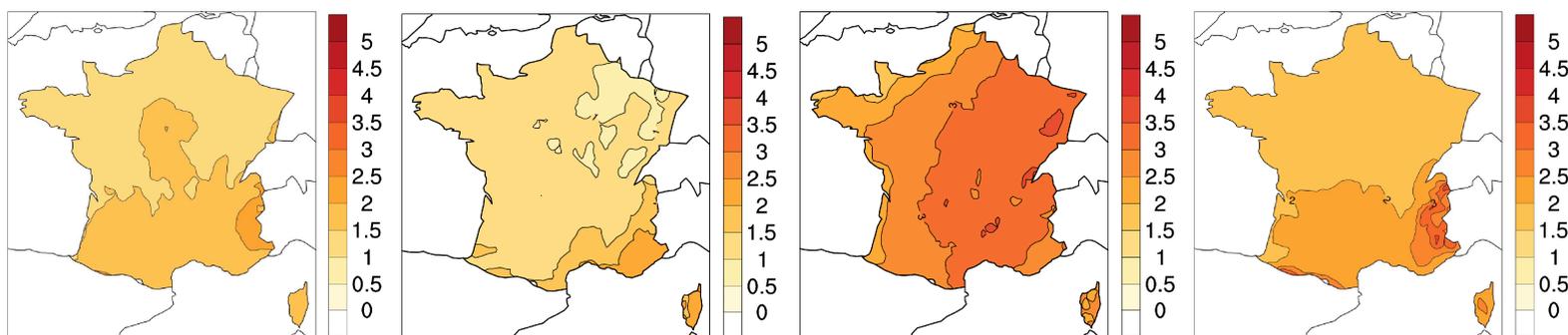


Figure 6: Écart de température estivale (°C) en France relativement à la référence 1976-2005, pour le scénario RCP4.5, aux horizons 2021-2050 et 2071-2100. Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25^e centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75^e centile de l'ensemble.

– RCP8.5 (figure 7) :

Comme pour le scénario RCP4.5, les résultats mettent en évidence un réchauffement **plus élevé à l'Est/Sud-Est** de la France métropolitaine pour l'**horizon proche**, et ce pour l'ensemble de nos simulations.

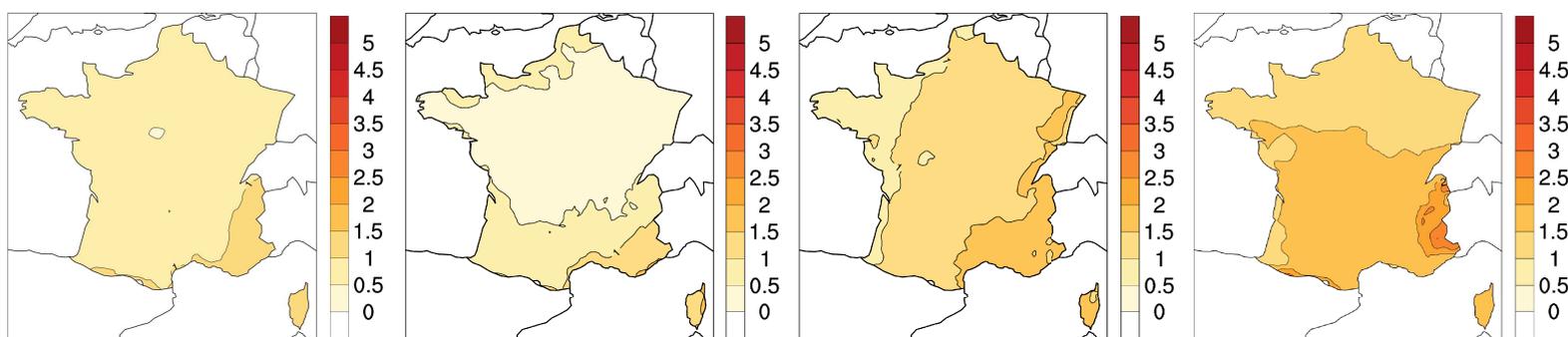
L'augmentation de la température moyenne estivale devient importante à l'horizon **2071-2100**, en **dépassant les 5 °C** (jusqu'à 7 °C pour les régions de l'Est) sur une large partie de la métropole pour le modèle Aladin-Climat. Notons que WRF simule un réchauffement peu marqué par rapport à l'ensemble de nos simulations, et que tous les modèles s'accordent sur la **répartition croissante de l'augmentation de température selon un axe Nord-Ouest/Sud-Est**.

C25 - 2021-2050

WRF - 2021-2050

Aladin-Climat - 2021-2050

C75 - 2021-2050



C25 - 2071-2100

WRF - 2071-2100

Aladin-Climat - 2071-2100

C75 - 2071-2100

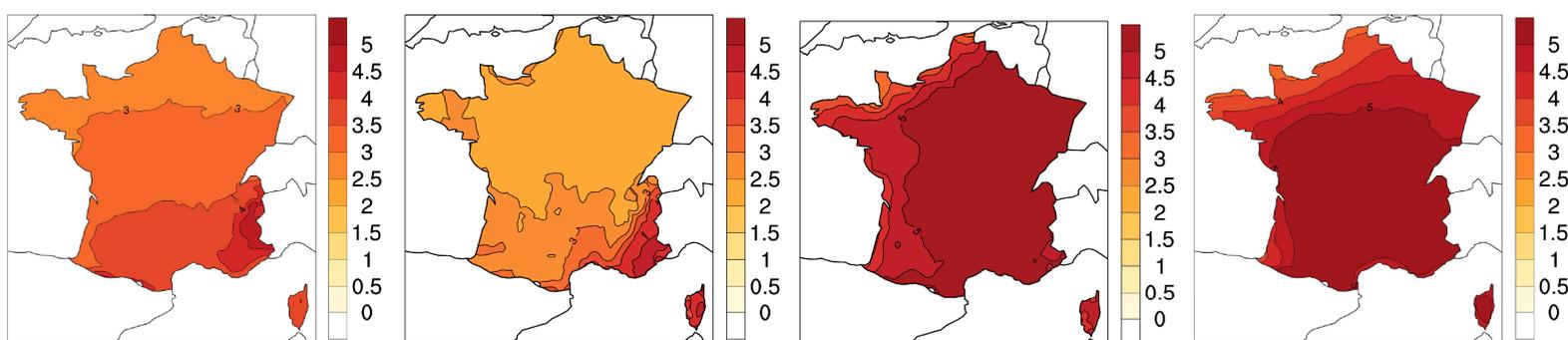


Figure 7: Écarts de température estivale (°C) en France relativement à la référence 1976-2005, pour le scénario RCP8.5, aux horizons 2021-2050 et 2071-2100. Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25^e centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75^e centile de l'ensemble.

3.2. Projections pour les précipitations moyennes

La figure 8 montre l'évolution du changement de précipitations (écart par rapport à la référence 1976-2005, en mm/jour) moyennée sur la France, pour les saisons hivernale (graphique de gauche) et estivale (graphique de droite), pour les trois scénarios RCP. Les diagrammes en boîte à droite des graphiques donnent la distribution des précipitations simulées par l'ensemble des modèles, en moyenne à l'horizon 2071-2100. Les enveloppes colorées donnent la dispersion des modèles issus de l'ensemble CMIP5 (voir définitions en partie 2.3). La courbe noire représente la moyenne d'ensemble des simulations « historiques » de CMIP5 (de 1950 à 2005).

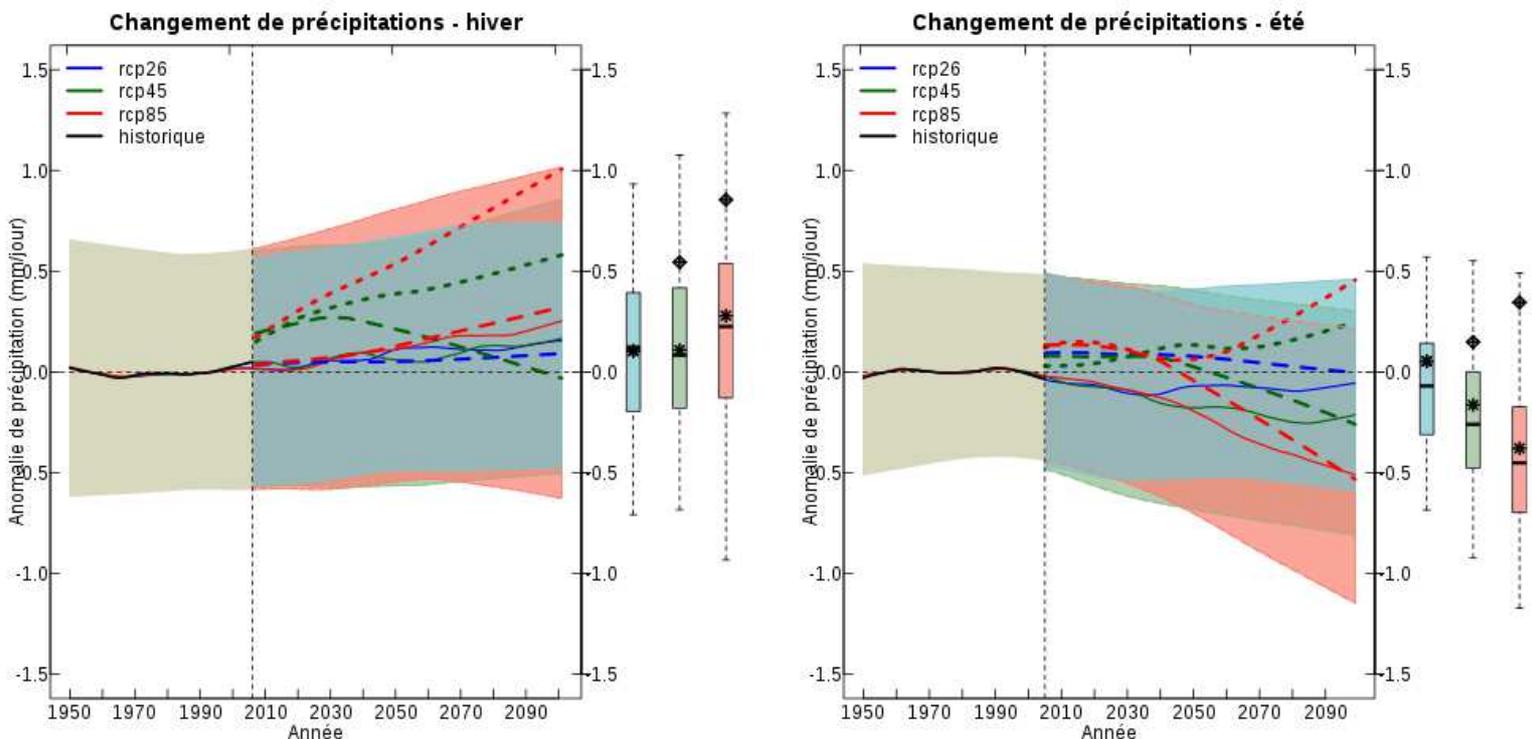


Figure 8: Evolution des précipitations en moyenne sur la France (mm/jour) en hiver (à gauche) et en été (à droite), relativement à la référence 1976-2005. Les moyennes d'ensemble de chaque scénario RCP (lignes continues, RCP2.6 en bleu, RCP4.5 en vert et RCP8.5 en rouge) sont accompagnées de leurs dispersions (enveloppes colorées correspondant à l'intervalle 5 %-95 % de l'ensemble). La courbe noire représente la moyenne d'ensemble des simulations « historiques » de CMIP5 (de 1950 à 2005), et l'enveloppe colorée associée la dispersion de cet ensemble. Les lignes discontinues et pointillées correspondent aux évolutions respectives pour les simulations Aladin-Climat et WRF. Les diagrammes en boîte donnent les distributions moyennes de l'ensemble sur la période 2071-2100 (minimum, 25^e centile, 50^e centile, 75^e centile et maximum), et sont accompagnés des moyennes 2071-2100 pour le modèle Aladin-Climat (astérisques noirs) et le modèle WRF (losanges noirs).

- En hiver :

Les évolutions des précipitations moyennes simulées par les modèles WRF et Aladin-Climat est cohérentes avec celles qui sont simulées par les modèles de l'ensemble CMIP5. L'ensemble des simulations montre une **augmentation progressive des précipitations** au

cours du XXI^e siècle, aboutissant à un changement de précipitations **de l'ordre de 0,10 à 0,28 mm/jour** en fin de siècle pour **Aladin-Climat** selon les scénarios. Le modèle **WRF** est dans la fourchette haute de l'ensemble, avec une augmentation des précipitations de **0,54 mm/jour** pour le scénario RCP4.5, et de **0,85 mm/jour** pour le scénario RCP8.5, en moyenne à l'horizon **2071-2100**.

- En été :

Les résultats mettent en évidence, le plus fréquemment, une **diminution des précipitations** au cours du XXI^e siècle, pour l'ensemble des modèles et pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Au cours des premières décennies, les résultats sont très proches pour les trois scénarios, et les modèles Aladin-Climat et WRF simulent une augmentation des précipitations, contrairement aux moyennes de l'ensemble CMIP5. Les trois scénarios se différencient à partir de la **seconde moitié du siècle**, avec une **diminution** des précipitations de **0,16 à 0,38 mm/jour** à l'horizon 2071-2100 pour le modèle **Aladin-Climat**. Le modèle **WRF** simule par contre une **augmentation** des précipitations, de **0,15 mm/jour** pour le scénario RCP4.5, à **0,32 mm/jour** pour le scénario RCP8.5, en moyenne sur la période 2071-2100, ce qui le place parmi les extrêmes de l'ensemble CMIP5.

Le tableau suivant résume les écarts de précipitations par rapport à la référence moyenne 1976-2005 (en mm/jour), pour chacun des modèles et scénarios, en moyenne aux horizons 2021-2050 et 2071-2100. Ces résultats doivent être pris avec précaution étant donnée la forte incertitude autour de l'évolution des précipitations. Par ailleurs, il s'agit de moyennes sur toute la France de valeurs susceptibles de montrer des différences régionales importantes.

PRECIPITATIONS		C25	WRF	Aladin-Climat	C75
HIVER					
2021-2050	RCP 2.6	-0,13	Indisponible	+0,21	+0,34
	RCP 4.5	-0,21	+0,07	+0,01	+0,32
	RCP 8.5	-0,16	+0,41	+0,20	+0,41
2071-2100	RCP 2.6	-0,19	Indisponible	+0,10	+0,39
	RCP 4.5	-0,8	+0,54	+0,11	+0,42
	RCP 8.5	-0,13	+0,85	+0,28	+0,54
ETE					
2021-2050	RCP 2.6	-0,27	Indisponible	~0	+0,11
	RCP 4.5	-0,40	+0,42	+0,36	~0
	RCP 8.5	-0,49	+0,08	+0,15	~0
2071-2100	RCP 2.6	-0,31	Indisponible	+0,05	+0,14
	RCP 4.5	-0,48	+0,15	-0,16	~0
	RCP 8.5	-0,70	+0,32	-0,38	-0,17

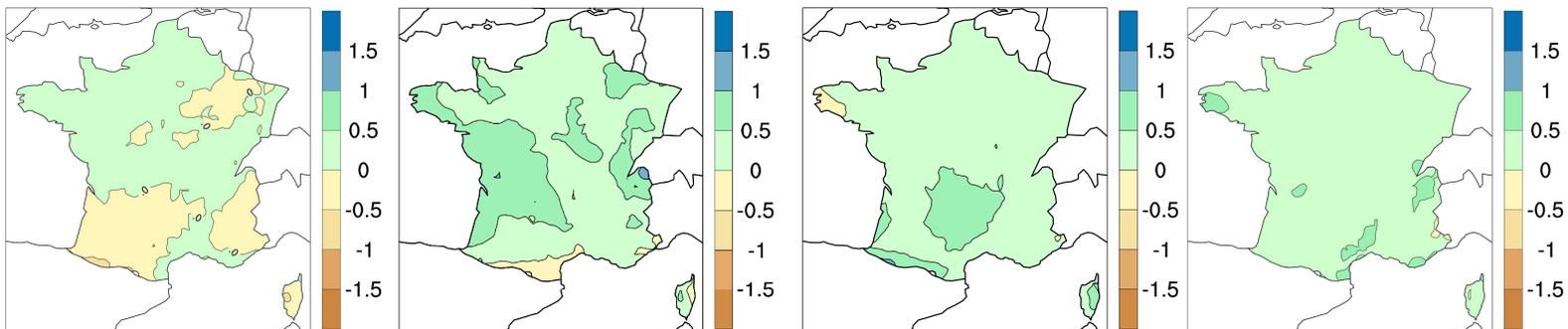
Afin d'évaluer spatialement le changement de précipitations sur la France métropolitaine, les figures suivantes montrent les cartes d'écart de précipitations par rapport à la référence 1976-2005, en moyenne aux horizons 2021-2050 et 2071-2100. Chaque figure présente le changement de précipitations pour un scénario et une saison (hivernale ou estivale). Les deux modèles WRF et Aladin-Climat (colonnes du milieu) sont replacés parmi les 25^e (C25) et 75^e (C75) centiles de l'ensemble de modèles régionaux Euro-Cordex (colonnes de gauche et droite).

C25 - 2021-2050

WRF - 2021-2050

Aladin-Climat - 2021-2050

C75 - 2021-2050



C25 - 2071-2100

WRF - 2071-2100

Aladin-Climat - 2071-2100

C75 - 2071-2100

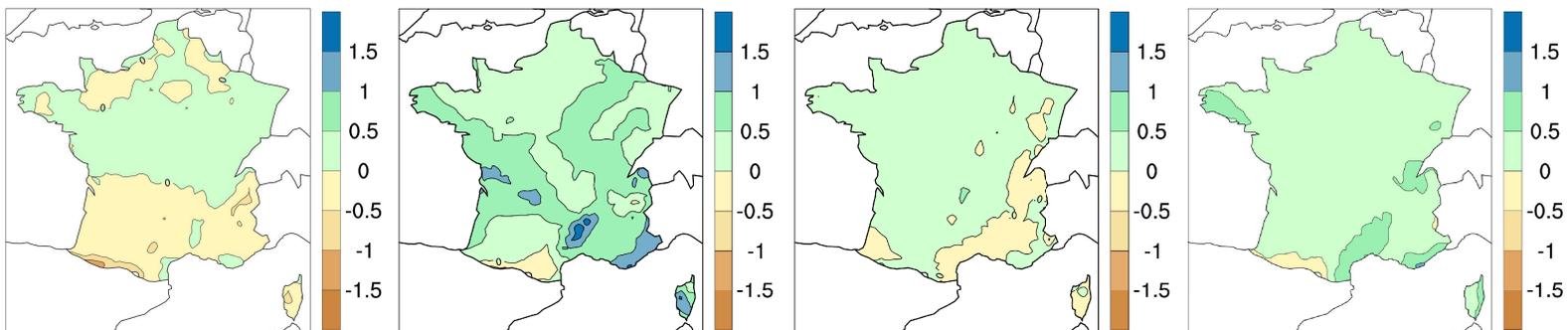


Figure 9: Écart de précipitations hivernales (mm/jour) en France relativement à la référence 1976-2005, pour le scénario RCP4.5, aux horizons 2021-2050 et 2071-2100. Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25^e centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75^e centile de l'ensemble.

- En hiver :
 - RCP4.5 (figure 9) :

Comme l'ont montré les courbes d'évolution des précipitations de la figure 8, nos deux modèles simulent une **augmentation des précipitations** sur l'ensemble du territoire, de manière équivalente pour les deux périodes considérées. Cependant, on peut localement observer quelques **disparités**. En particulier, alors que le modèle Aladin-Climat simule une augmentation des

précipitations près du Massif Central, la simulation WRF montre une augmentation plus importante des précipitations sur d'autres régions.

– RCP8.5 (figure 10) :

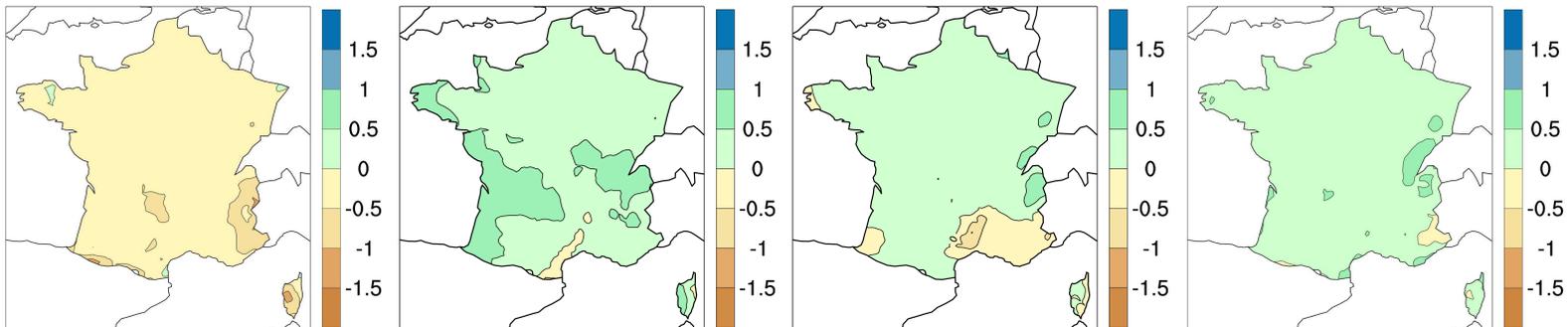
Si l'ensemble des modèles simule une **augmentation des précipitations** aux deux horizons considérés sur une large partie du territoire, on observe là encore des **disparités entre les modèles**. En particulier, les résultats issus du modèle WRF montrent une augmentation des précipitations assez élevée, en particulier à l'horizon 2071-2100. Cependant, malgré l'incertitude autour de l'amplitude et de la répartition géographique du changement de précipitations, les modèles semblent s'accorder sur une diminution des précipitations près des régions pyrénéennes à la fin du siècle, de l'ordre de 0,25 à 1 mm/jour.

C25 - 2021-2050

WRF - 2021-2050

Aladin-Climat - 2021-2050

C75 - 2021-2050



C25 - 2071-2100

WRF - 2071-2100

Aladin-Climat - 2071-2100

C75 - 2071-2100

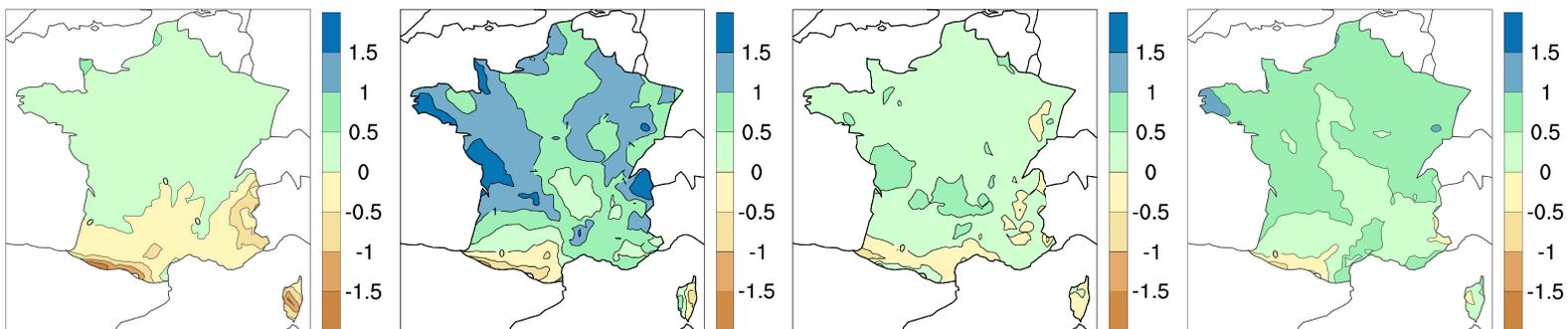


Figure 10: Écarts de précipitations hivernales (mm/jour) en France relativement à la référence 1976-2005, pour le scénario RCP8.5, aux horizons 2021-2050 et 2071-2100. Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25^e centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75^e centile de l'ensemble.

• En été :

– RCP4.5 (figure 11) :

A l'horizon **2021-2050**, les résultats associés au scénario RCP4.5 ne semblent **pas** montrer

de changement très marqué sur l'ensemble du territoire. Notons par ailleurs que le modèle WRF simule une augmentation des précipitations élevée près du littoral de la Manche et de l'Atlantique, ainsi que près des régions savoyardes près des régions savoyardes qu'au Nord des Alpes. Le changement le long des côtes semble davantage lié à une incertitude associée à la modélisation qu'à une possible augmentation des précipitations spécifiques à ces régions⁹. Malgré un signal peu marqué dans l'ensemble, un découpage Nord/Sud semble se dessiner dans l'ensemble des modèles, avec globalement davantage de précipitations au Nord, et un assèchement au Sud du pays.

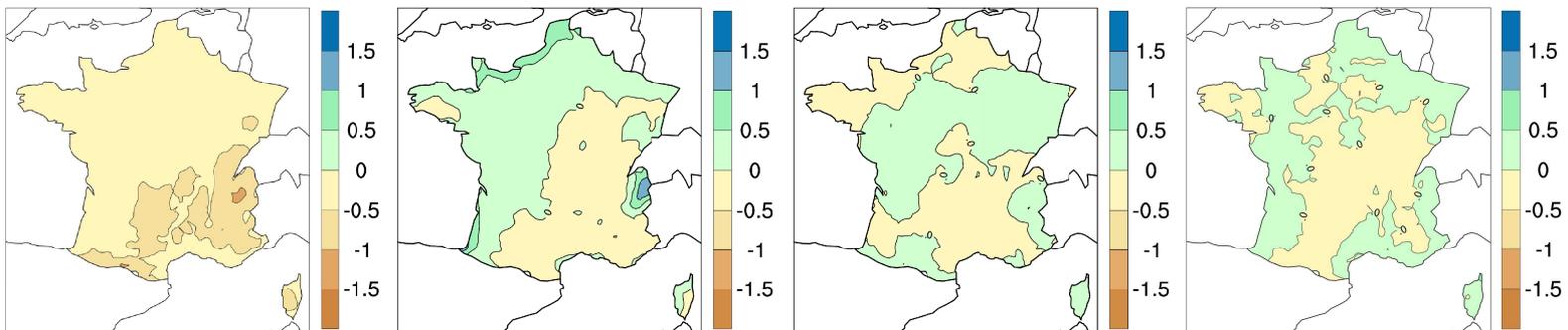
En **fin de siècle**, les résultats ne permettent **pas de dégager une tendance claire** sur l'évolution des précipitations estivales, les modèles WRF et Aladin-Climat étant globalement en désaccord sur le signe du changement.

C25 - 2021-2050

WRF - 2021-2050

Aladin-Climat - 2021-2050

C75 - 2021-2050



C25 - 2071-2100

WRF - 2071-2100

Aladin-Climat - 2071-2100

C75 - 2071-2100

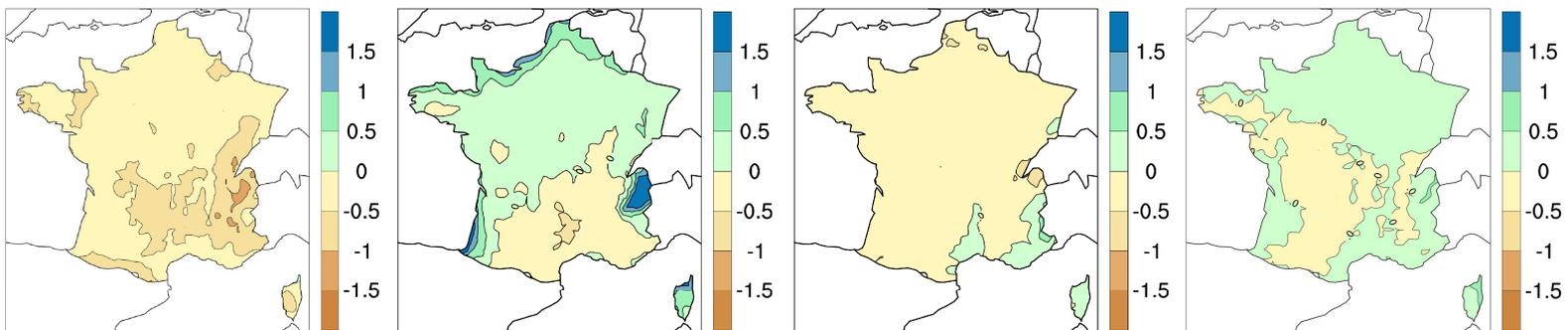


Figure 11: Écarts de précipitations estivales (mm/jour) en France relativement à la référence 1976-2005, pour le scénario RCP4.5, aux horizons 2021-2050 et 2071-2100. Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25^e centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75^e centile de l'ensemble.

– RCP8.5 (figure 12) :

A l'horizon **2021-2050**, le modèle **Aladin-Climat** simule une **légère augmentation** des précipitations estivales en France, avec des valeurs comprises entre 0,25 et 0,75 mm/jour près des

⁹Le modèle WRF simule beaucoup de pluies convectives en été liées à des températures de la mer élevées. Ce surplus de précipitations près des côtes, certains jours d'été, engendre un biais en moyenne estivale, qui s'amplifie avec le changement climatique.

régions Alpines. Il se situe dans la fourchette haute de l'ensemble multi-modèle. Le modèle **WRF** simule quant à lui un **contraste Nord-Sud** des changements de précipitations.

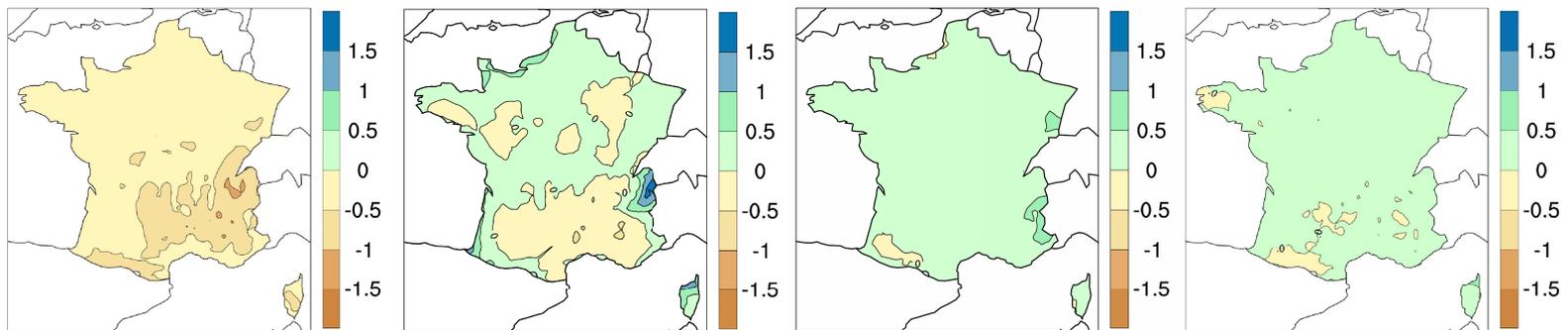
A la **fin du siècle**, la **diminution des précipitations** est comprise entre 0,25 et 1 mm/jour sur l'**essentiel du territoire** métropolitain pour le modèle modèle **Aladin-Climat**. Le modèle **WRF** se situe dans la fourchette haute, avec une **augmentation** des précipitations sur le territoire, **sauf dans l'Ouest et dans le quart Sud-Est**.

C25 - 2021-2050

WRF - 2021-2050

Aladin-Climat - 2021-2050

C75 - 2021-2050



C25 - 2071-2100

WRF - 2071-2100

Aladin-Climat - 2071-2100

C75 - 2071-2100

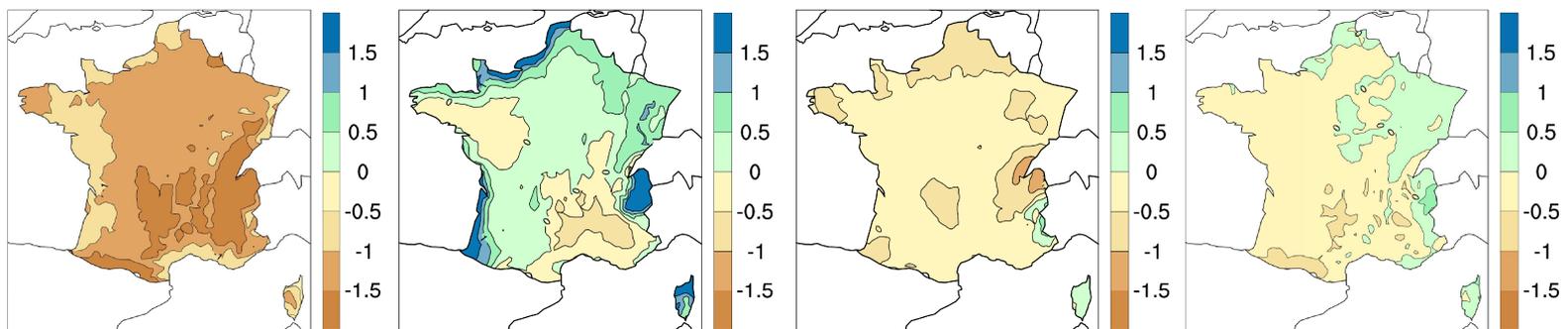


Figure 12: Écarts de précipitations estivales (mm/jour) en France relativement à la référence 1976-2005, pour le scénario RCP8.5, aux horizons 2021-2050 et 2071-2100. Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25^e centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75^e centile de l'ensemble.

La suite de cette partie se concentre sur l'étude de quatre indices d'extrêmes en France métropolitaine: les vagues de chaleur, extrêmes froids hivernaux, précipitations extrêmes et périodes de sécheresse. Le lecteur pourra découvrir une liste plus complète d'indices climatiques sur le portail DRIAS (<http://www.drias-climat.fr/decouverte>), qui rassemble notamment les 18 indices présents dans le précédent rapport.

3.3. Vagues de chaleur

Les figures 13 et 14 montrent le **nombre de jours de vagues de chaleur en moyenne estivale** pour la période de référence 1976-2005 et les écarts à cette référence, pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, aux horizons 2021-2050 et 2071-2100, pour les modèles WRF, Aladin-Climat, et les 25^e et 75^e centiles de l'ensemble multi-modèle. Une vague de chaleur est définie comme une période anormalement chaude durant plus de cinq jours consécutifs (voir la partie 5.3 de l'annexe pour une définition plus détaillée).

Le nombre de jours de vagues de chaleur modélisé par WRF et Aladin-Climat sur la période de référence **1976-2005** est compris **entre 2 et 4 à l'Ouest du territoire**, et va jusqu'à plus de 6 au Nord-Est pour Aladin-Climat¹⁰.

A l'**horizon 2021-2050**, l'ensemble des modèles simule une **augmentation du nombre de jours de vagues de chaleur** en moyenne sur les mois d'été. Pour les deux scénarios considérés, cette augmentation est modérée, allant de **0 à 5 jours** sur l'ensemble du territoire, voire de **5 à 10 jours** pour le scénario RCP4.5 dans des régions du **quart Sud-Est**.

Cette augmentation est encore **plus importante en fin de siècle**, et se situe pour le scénario RCP4.5 entre 5 et 10 jours sur les régions de l'Ouest, et jusqu'à 20 jours à l'Est du pays pour Aladin-Climat. Bien que l'amplitude du changement soit différente pour WRF et Aladin-Climat, les résultats mettent en évidence une augmentation **globalement plus marquée** en allant **vers le Sud-Est**, et ce pour les deux modèles. Ces résultats sont encore plus marqués pour le scénario RCP8.5, qui montre une augmentation du nombre de jours de vagues de chaleur de **5 à plus de 20 jours** supplémentaires **en moyenne** estivale (voire dépassant les 40 jours vers les régions du Sud-Est pour Aladin-Climat, qui simule des valeurs parmi les plus élevées de l'ensemble multi-modèle).

¹⁰ Notons que malgré la correction effectuée à partir des données SAFRAN, des différences sont visibles entre les modèles sur la période de référence. Ceci est lié au fait que cet indice est défini à partir d'un critère de durée (nombre de jours supérieurs de 5°C à la valeur climatologique pendant au moins 5 jours consécutifs), la correction utilisée n'agissant pas sur la durée des événements (voir la partie 5.1 en annexe pour davantage d'explications sur la méthode de correction).

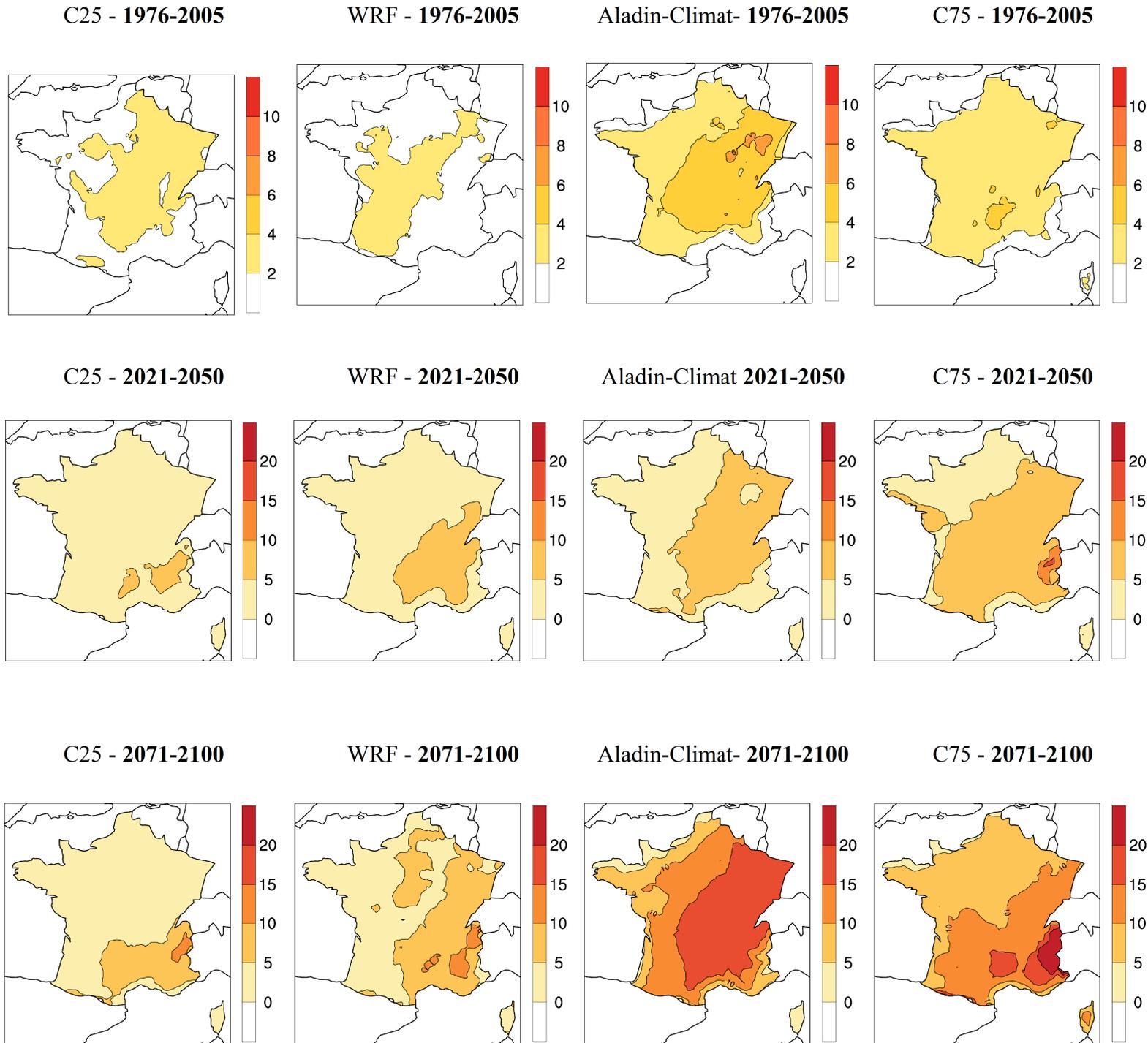


Figure 13: Nombre de jours de vagues de chaleur en été pour la période de référence 1976-2005 (ligne du haut) et les écarts à cette référence pour le scénario **RCP4.5**, aux horizons 2021-2050 (ligne du milieu) et 2071-2100 (ligne du bas). Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25^e centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75^e centile de l'ensemble.

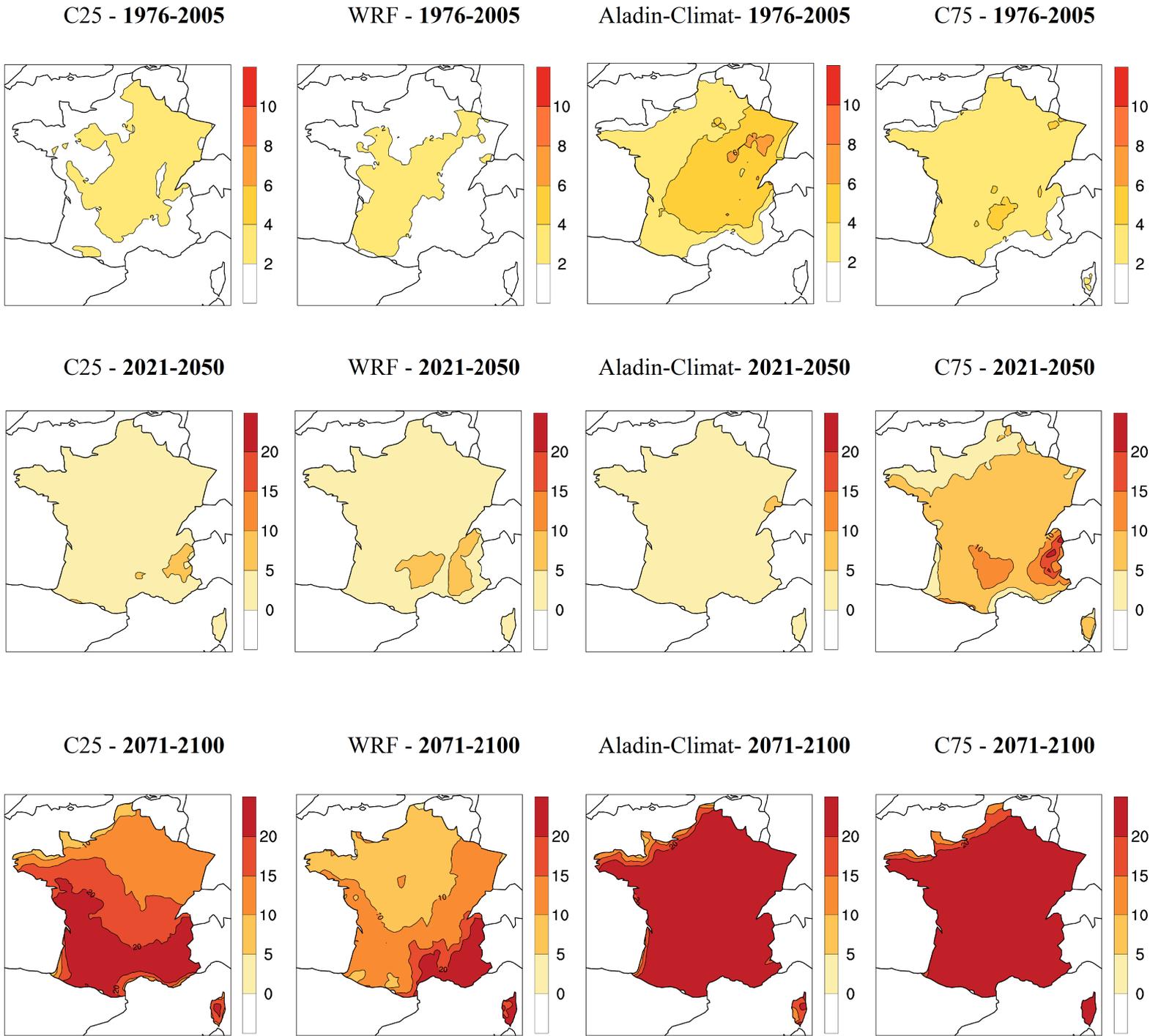


Figure 14: Nombre de jours de vagues de chaleur en été pour la période de référence 1976-2005 (ligne du haut) et les écarts à cette référence pour le scénario **RCP8.5**, aux horizons 2021-2050 (ligne du milieu) et 2071-2100 (ligne du bas). Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25^e centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75^e centile de l'ensemble.

3.4. Extrêmes froids

Les figures 15 et 16 montrent le nombre de jours à température anormalement basse en moyenne en hiver, pour la période de référence 1976-2005 et les écarts à cette référence, pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, aux horizons 2021-2050 et 2071-2100, pour les modèles WRF, Aladin-Climat et les 25^e et 75^e centiles de l'ensemble multi-modèle. On considère qu'un jour a une température anormalement basse si sa température minimale est inférieure de plus de 5 °C à une valeur de référence (voir la partie 5.3 de l'annexe pour une définition plus détaillée de l'indice).

En moyenne sur la saison hivernale, la période 1976-2005 compte plus de 10 jours très froids près des régions d'influence Atlantique jusqu'au Nord-Est du pays, et de 2 à 10 jours sur le reste du territoire. Le réchauffement prévu au cours du XXI^e siècle devrait conduire à une **diminution des jours anormalement froids sur l'ensemble de la France métropolitaine**, à partir des prochaines décennies.

A l'**horizon proche**, cette diminution est comprise entre **1 et 4 jours** sur tout le territoire, voire jusqu'à **6 jours au Nord-Est du pays**. Cette diminution est équivalente pour les deux scénarios RCP. Pour le scénario RCP4.5, on peut constater que les modèles WRF et Aladin-Climat se placent de part et d'autre de la distribution de l'ensemble Euro-Cordex.

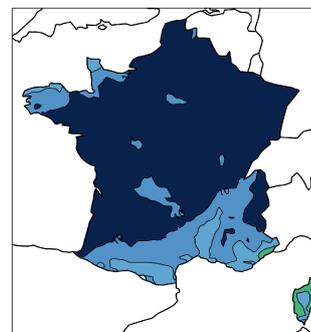
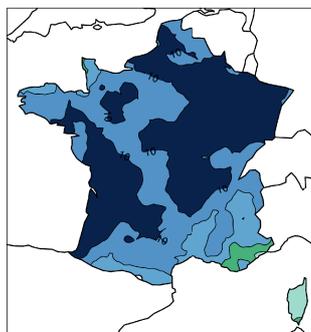
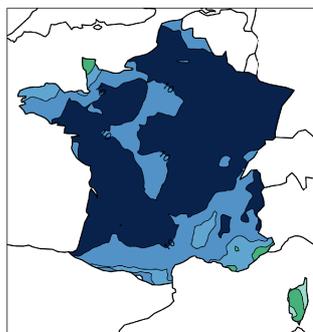
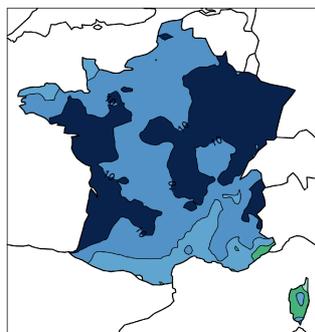
Cette diminution des extrêmes froids est **plus importante en fin de siècle**, en particulier pour le scénario RCP8.5, avec une amplitude plus ou moins marquée selon les modèles. Les résultats montrent toutefois que quel que soit le scénario ou le modèle considéré, la diminution du nombre de jours très froids en hiver est **moins importante dans l'extrême Sud du pays** avec **2 à 8 jours** de moins que la moyenne de référence. A l'inverse, cette diminution est **plus importante au Nord-Est** de la France, allant de **6 à plus de 10 jours** selon les scénarios et modèles.

C25 - 1976-2005

WRF - 1976-2005

Aladin-Climat- 1976-2005

C75 - 1976-2005

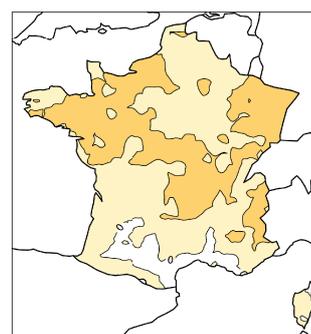
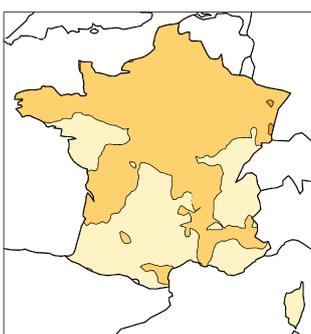
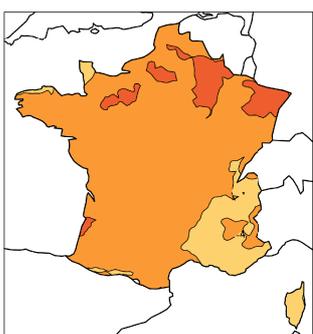
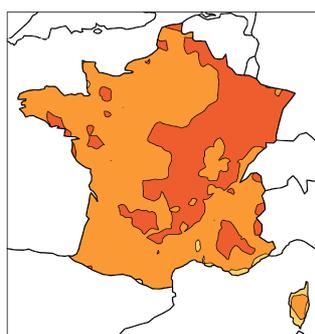


C25 - 2021-2050

WRF - 2021-2050

Aladin-Climat- 2021-2050

C75 - 2021-2050



C25 - 2071-2100

WRF - 2071-2100

Aladin-Climat- 2071-2100

C75 - 2071-2100

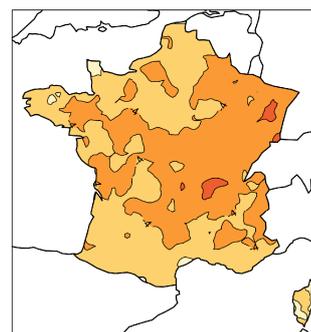
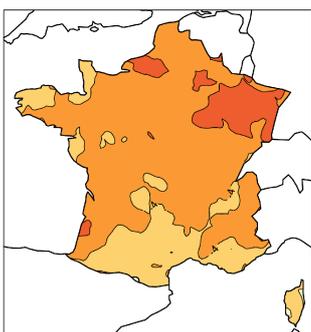
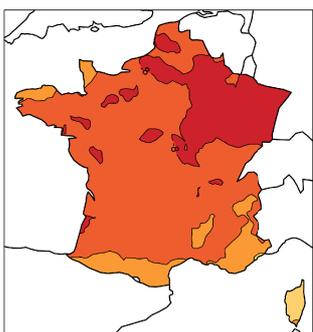
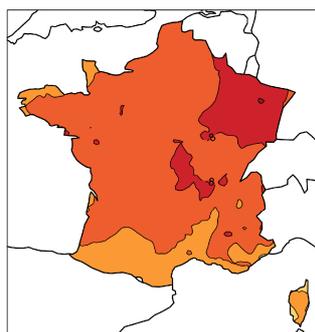


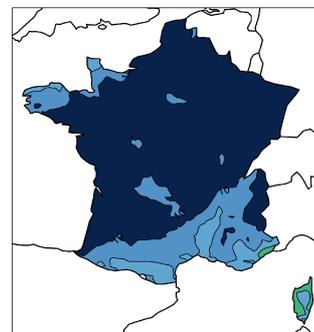
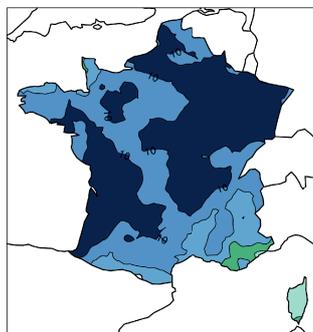
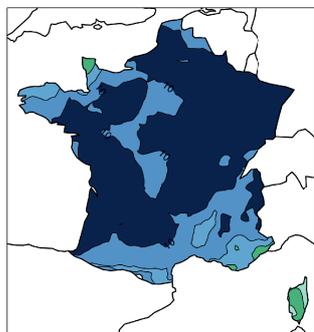
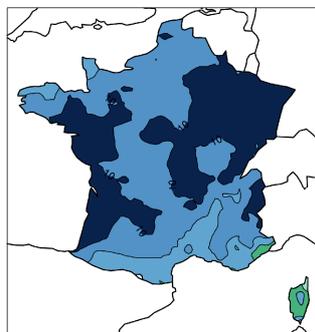
Figure 15: Nombre de jours hivernaux à température anormalement basse, pour la période de référence 1976-2005 (ligne du haut) et les écarts à cette référence pour le scénario **RCP4.5**, aux horizons 2021-2050 (ligne du milieu) et 2071-2100 (ligne du bas). Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25^e centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75^e centile de l'ensemble.

C25 - 1976-2005

WRF - 1976-2005

Aladin-Climat- 1976-2005

C75 - 1976-2005

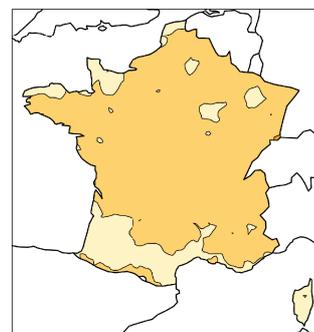
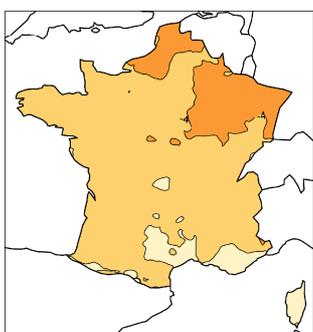
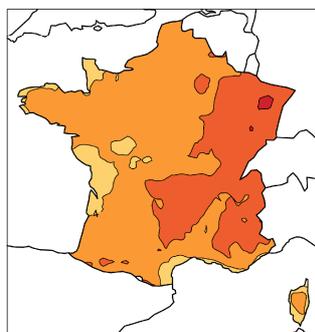


C25 - 2021-2050

WRF - 2021-2050

Aladin-Climat- 2021-2050

C75 - 2021-2050



C25 - 2071-2100

WRF - 2071-2100

Aladin-Climat- 2071-2100

C75 - 2071-2100

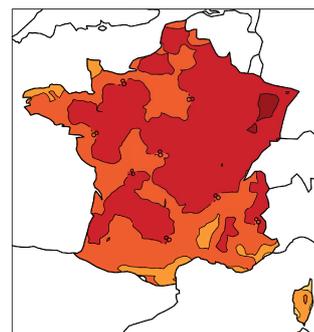
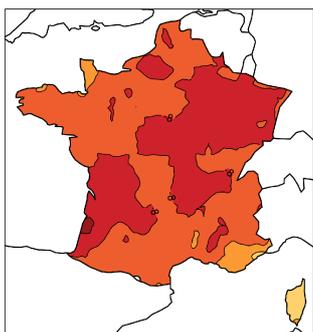
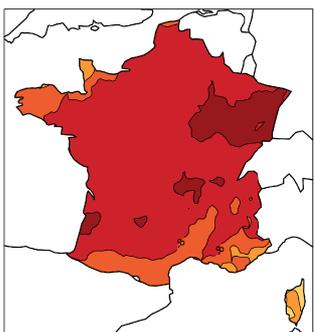
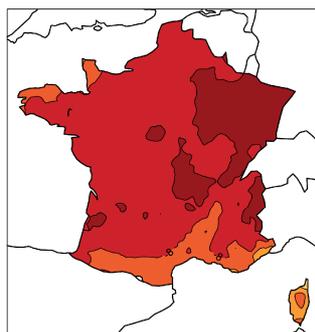


Figure 16: Nombre de jours hivernaux à température anormalement basse, pour la période de référence 1976-2005 (ligne du haut) et les écarts à cette référence pour le scénario **RCP8.5**, aux horizons 2021-2050 (ligne du milieu) et 2071-2100 (ligne du bas). Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25^e centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75^e centile de l'ensemble.

3.5. Précipitations extrêmes

Les figures 17 et 18 montrent le pourcentage des précipitations extrêmes annuelles, pour la période de référence 1976-2005 et les écarts à cette référence, pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, aux horizons 2021-2050 et 2071-2100, pour les modèles WRF, Aladin-Climat et les 25^e et 75^e centiles de l'ensemble multi-modèle. Le pourcentage de précipitations extrêmes est défini comme la part des événements de fortes précipitations sur le total des précipitations annuelles (voir la partie 5.3 de l'annexe pour une définition plus détaillée).

Pour la **période de référence**, les pluies les plus intenses se situent sur les régions d'**influence méditerranéenne**, où plus de **75 %** des pluies annuelles sont extrêmes, ainsi que sur une large partie **Ouest du pays**, où l'on atteint jusqu'à **70 %** de précipitations extrêmes. Les régions situées au **Nord/Nord-Est** et dans le centre sont quant à elles **moins concernées** par les événements de précipitations extrêmes (entre 55 et 60 % de pluies extrêmes en moyenne annuelle).

A l'**horizon 2021-2050**, les modèles Aladin-Climat et WRF simulent de **faibles changements** des pourcentages de précipitations extrêmes. Cependant, les deux modèles se situent dans la fourchette basse de l'ensemble multi-modèle. Les valeurs de la carte C75 indiquent que 25 % des modèles de l'ensemble Euro-Cordex simulent une augmentation du taux de précipitations extrêmes par rapport à la référence 1976-2005, dépassant les 5 % dans les régions du Sud-Est.

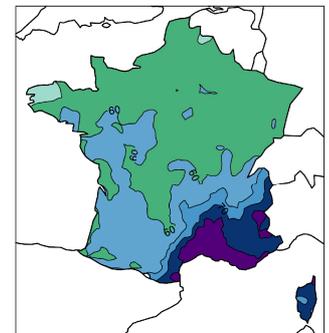
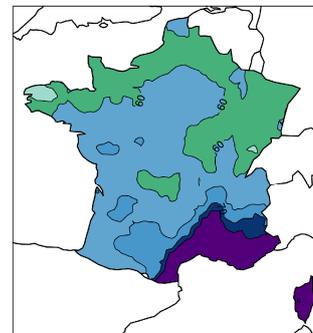
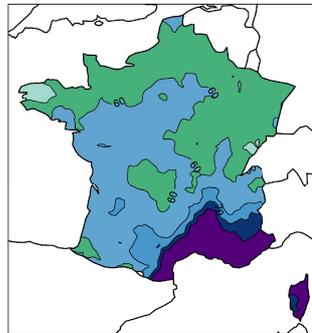
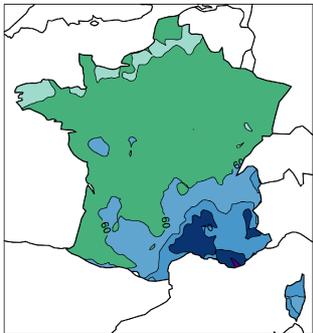
En fin de siècle, les résultats montrent un **renforcement du taux de précipitations extrêmes** à l'exception de quelques régions de faibles étendues. Le modèle Aladin-Climat simule une forte hausse sur une grande partie du territoire pour le scénario **RCP8.5**, avec des **valeurs dépassant les 5 %** (et atteignant 10 % dans les régions du Nord-Est), en accord avec le 75^e centile de l'ensemble multi-modèle. Pour le modèle WRF et ce même scénario, les régions concernées par ces pourcentages sont généralement différentes.

C25 - 1976-2005

WRF - 1976-2005

Aladin-Climat- 1976-2005

C75 - 1976-2005

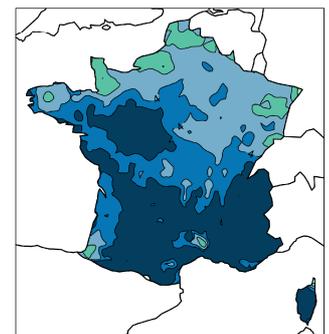
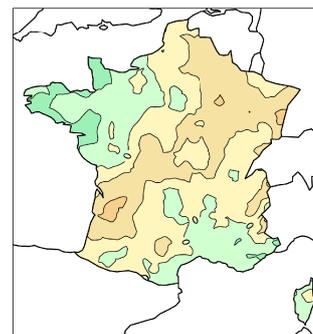
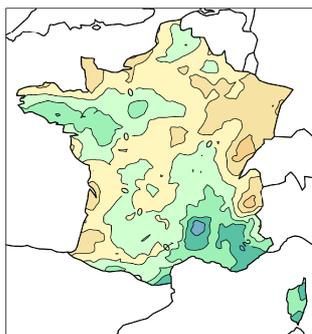
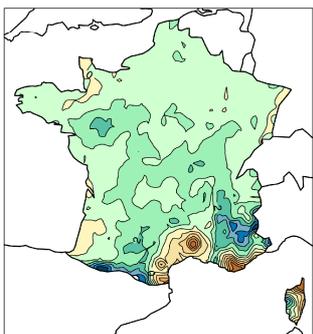


C25 - 2021-2050

WRF - 2021-2050

Aladin-Climat- 2021-2050

C75 - 2021-2050



C25 - 2071-2100

WRF - 2071-2100

Aladin-Climat- 2071-2100

C75 - 2071-2100

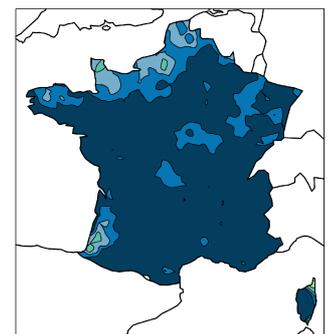
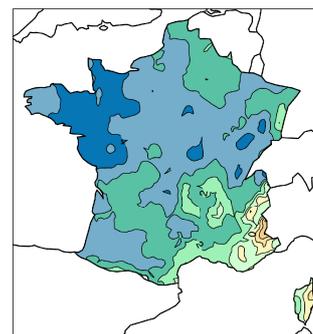
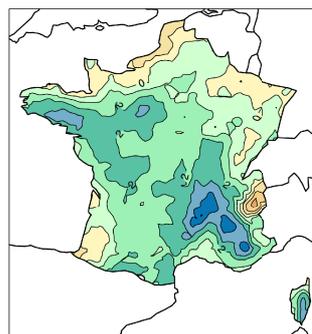
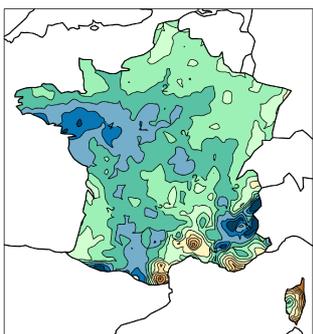


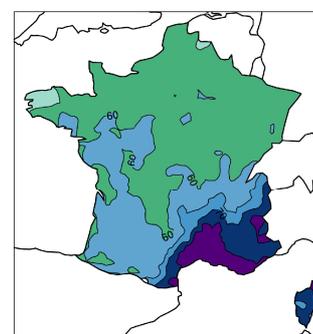
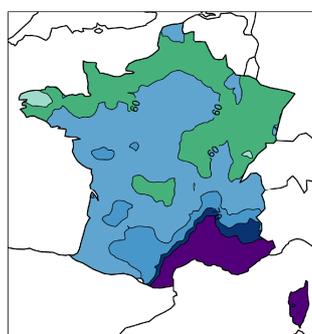
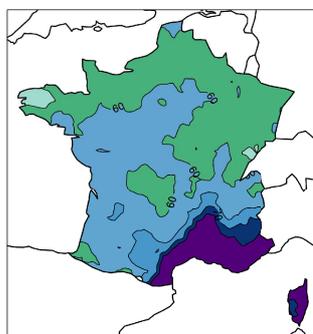
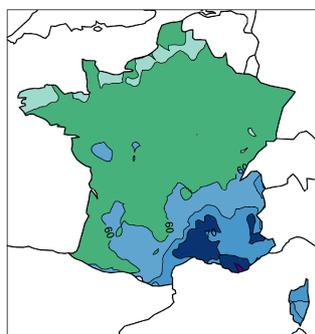
Figure 17: Pourcentage des précipitations extrêmes annuelles, pour la période de référence 1976-2005 (ligne du haut) et les écarts à cette référence pour le scénario RCP4.5, aux horizons 2021-2050 (ligne du milieu) et 2071-2100 (ligne du bas). Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25^e centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75^e centile de l'ensemble.

C25 - 1976-2005

WRF - 1976-2005

Aladin-Climat- 1976-2005

C75 - 1976-2005

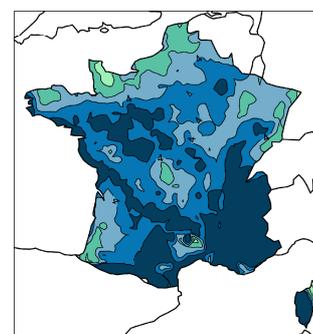
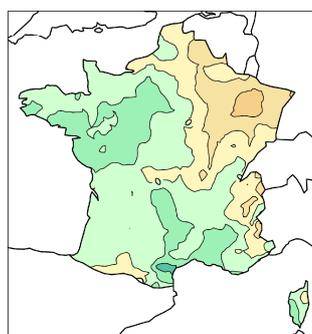
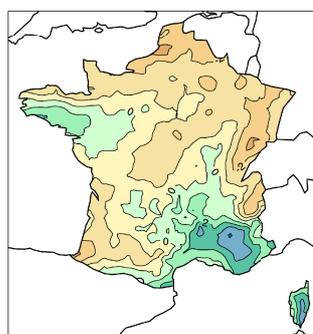
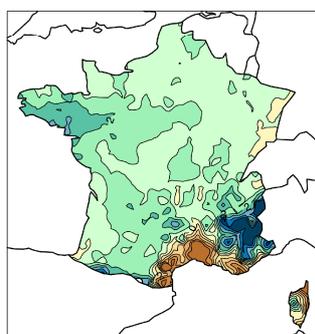


C25 - 2021-2050

WRF - 2021-2050

Aladin-Climat- 2021-2050

C75 - 2021-2050



C25 - 2071-2100

WRF - 2071-2100

Aladin-Climat- 2071-2100

C75 - 2071-2100

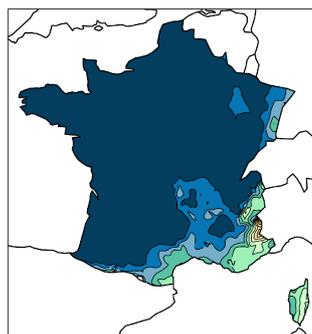
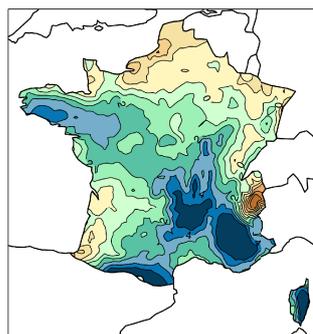
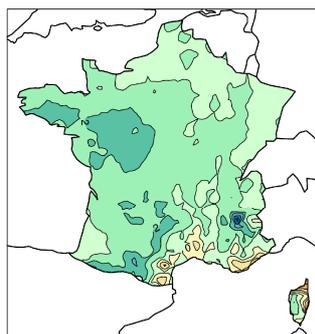


Figure 18: Pourcentage des précipitations extrêmes annuelles, pour la période de référence 1976-2005 (ligne du haut) et les écarts à cette référence pour le scénario **RCP8.5**, aux horizons 2021-2050 (ligne du milieu) et 2071-2100 (ligne du bas). Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25^e centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75^e centile de l'ensemble.

3.6. Périodes de sécheresse estivale

Les figures 19 et 20 montrent le nombre de jours constituant des périodes de sécheresse estivale, pour la période de référence 1976-2005 et les écarts à cette référence, pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, aux horizons 2021-2050 et 2071-2100, pour les modèles WRF, Aladin-Climat et les 25^e et 75^e centiles de l'ensemble multi-modèle. Une période de sécheresse est définie comme le nombre de jours secs consécutifs. Un jour est considéré comme sec si les précipitations quotidiennes lui correspondant n'ont pas excédé 1 mm (voir la partie 5.3 de l'annexe pour davantage de détails).

Les régions les plus concernées par les épisodes de sécheresse estivale pour la **période de référence** sont les mêmes que les plus touchées par les précipitations extrêmes. En effet, les régions d'influence **méditerranéenne** comptent **plus de 25 jours** d'épisodes de sécheresse en moyenne en été. Une large **façade Ouest** est touchée à hauteur de **15 à 20 jours** en moyenne estivale.

L'estimation des périodes de sécheresse estivale est soumise à de **fortes incertitudes** aux deux horizons considérés, liées à l'incertitude sur les précipitations moyennes. En effet, à l'**horizon 2021-2050**, les modèles WRF et Aladin-Climat sont en désaccord sur le signe du changement du nombre de jours secs sur le territoire, avec des écarts à la référence **ne dépassant** généralement **pas les 2 jours**, quel que soit le scénario RCP envisagé.

A l'**horizon 2071-2100**, les **écarts** à la référence **se renforcent**, mais les modèles WRF et Aladin-Climat sont toujours en désaccord sur le signe de cet écart, en particulier dans la partie Nord du pays. Toutefois, les modèles semblent s'accorder sur une **augmentation** des **épisodes de sécheresse** au **Sud** du pays, en particulier dans le **Sud-Est**, avec **2 à 8 jours** secs de plus que la référence suivant le modèle, pour le scénario RCP4.5. Si le modèle **WRF** se situe dans la fourchette basse de l'ensemble, avec une **augmentation** des jours secs **modérée** dans le **Sud** de la France, **Aladin-Climat** montre une **augmentation plus marquée** et étendue à l'**essentiel du territoire**, en particulier à l'Ouest du pays, et se place près du 75^e centile de l'ensemble. Cette augmentation du nombre de jours secs simulée est amplifiée si l'on considère le scénario RCP8.5.

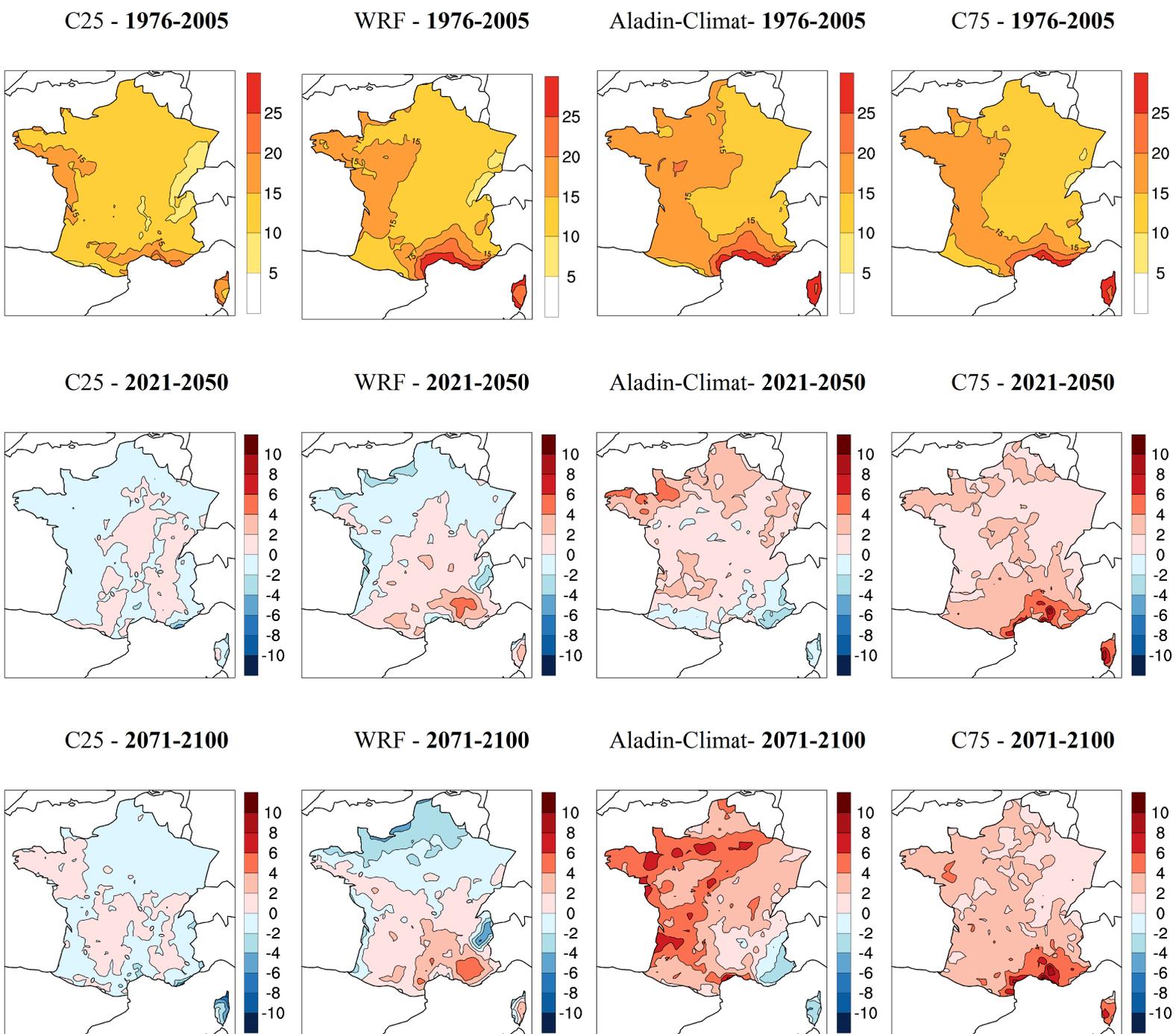


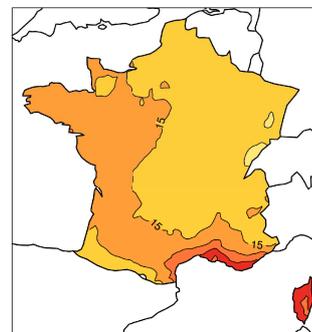
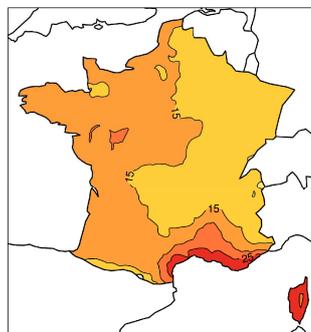
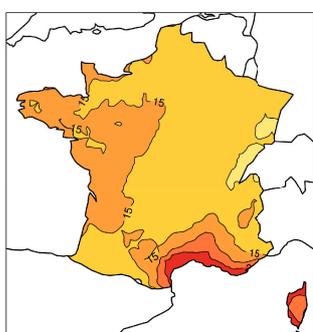
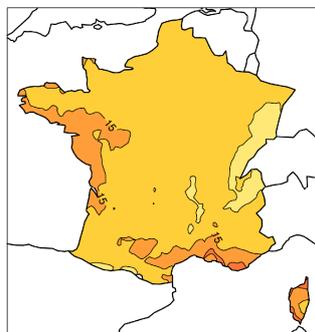
Figure 19: Nombre de jours consécutifs avec moins de 1 mm de précipitations estivales, pour la période de référence 1976-2005 (ligne du haut) et les écarts à cette référence pour le scénario RCP4.5, aux horizons 2021-2050 (ligne du milieu) et 2071-2100 (ligne du bas). Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25^e centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75^e centile de l'ensemble.

C25 - 1976-2005

WRF - 1976-2005

Aladin-Climat- 1976-2005

C75 - 1976-2005

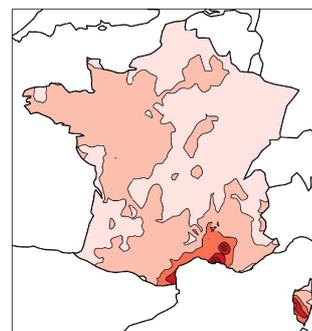
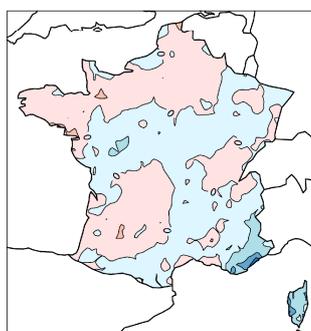
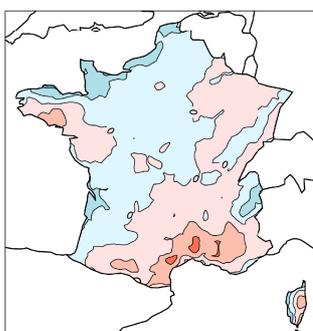
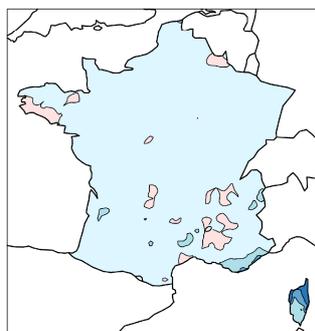


C25 - 2021-2050

WRF - 2021-2050

Aladin-Climat- 2021-2050

C75 - 2021-2050



C25 - 2071-2100

WRF - 2071-2100

Aladin-Climat- 2071-2100

C75 - 2071-2100

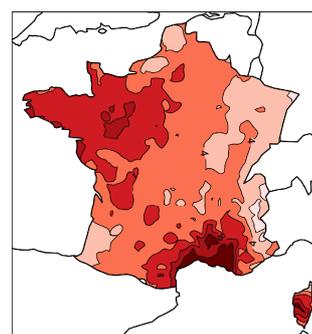
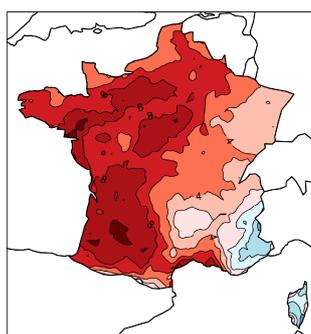
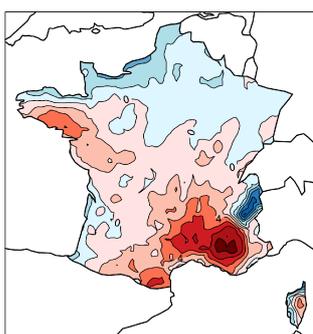
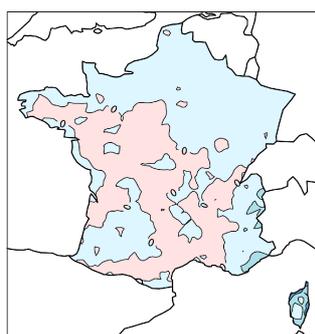


Figure 20: Nombre de jours consécutifs avec moins de 1 mm de précipitations estivales, pour la période de référence 1976-2005 (ligne du haut) et les écarts à cette référence pour le scénario RCP8.5, aux horizons 2021-2050 (ligne du milieu) et 2071-2100 (ligne du bas). Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25^e centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75^e centile de l'ensemble.

3.7. Vents violents

Les conclusions présentées dans cette section sont fondées sur l'étude d'un indice de vent maximal en hiver ne prenant pas en compte les rafales. Comme elles ne portent que sur les deux modèles Aladin-Climat et WRF, elles ne s'accompagnent pas de considérations sur l'incertitude multi-modèle. Sur la période **1976-2005** en hiver, les **vents les plus forts** se situent près des côtes de la **Manche**, de la **Bretagne**, sur une partie de la **façade atlantique**, ainsi que près des **côtes méditerranéennes**. Les premières estimations montrent que l'intensité des vents les plus violents pourrait être amenée à **diminuer** à la **fin du XXI^e siècle** sur **l'ensemble du territoire** pour le modèle **Aladin-Climat**, quel que soit le scénario RCP envisagé. Si le modèle **WRF** semble également montrer une **diminution** des vents violents hivernaux au **Sud du pays**, il simule globalement une **augmentation** des vents violents dans la partie **Nord du territoire**. Cette première analyse donne donc une indication sur les vents moyens les plus forts, avec des **résultats contrastés** selon le modèle sur la **partie Nord du pays**. Cependant, elle ne permet pas de tirer de conclusions sur la fréquence et l'intensité des tempêtes hivernales qui nécessiteraient une étude spécifique.

En résumé

Changement climatique en métropole

Cette étude permet de faire ressortir certaines tendances liées aux changements de température et précipitations en France métropolitaine:

A l'horizon 2021-2050 :

- Une hausse des températures moyennes, comprise entre 0,6 °C et 1,3 °C [0,3 °C/ 2 °C]¹, toutes saisons confondues, par rapport à la moyenne de référence calculée sur la période 1976-2005, selon les scénarios et les modèles. Cette hausse devrait être plus importante dans le Sud-Est de la France en été, avec des écarts à la référence pouvant atteindre 1,5 °C à 2 °C.
- Une augmentation du nombre de jours de vagues de chaleur en été, comprise entre 0 et 5 jours sur l'ensemble du territoire, voire de 5 à 10 jours dans des régions du quart Sud-Est.
- Une diminution des jours anormalement froids en hiver sur l'ensemble de la France métropolitaine, entre 1 et 4 jours en moyenne, et jusqu'à 6 jours au Nord-Est du pays.
- Une légère hausse des précipitations moyennes, en été comme en hiver, comprise entre 0 et 0,42 [-0,49/+0,41] mm/jour en moyenne sur la France, avec une forte incertitude sur la distribution géographique de ce changement.
- Les deux modèles climatiques régionaux Aladin-Climat et WRF simulent de faibles changements des pourcentages de précipitations extrêmes. Cependant, ces modèles se situent dans la fourchette basse de l'ensemble multi-modèle européen.

A l'horizon 2071-2100 :

- Une forte hausse des températures moyennes. Pour le scénario RCP2.6, elle est de 0,9 °C [0,4 °C/1,4 °C] en hiver, et de 1,3 °C [0,6 °C/2 °C] en été. Pour le scénario RCP8.5, elle est comprise entre 3,4 °C et 3,6 °C [1,9 °C/3,4 °C] en hiver, et entre 2,6 °C et 5,3 °C [3,2 °C/5,1 °C] en été. Cette hausse devrait être particulièrement marquée en allant vers le Sud-Est du pays, et pourrait largement dépasser les 5 °C en été par rapport à la moyenne de référence.
- Cette hausse des températures est associée à une forte augmentation du nombre de jours de vagues de chaleur en été, qui pourrait dépasser les 20 jours pour le scénario RCP8.5.
- La diminution des extrêmes froids se poursuit en fin de siècle. Elle est comprise entre 6 et 10 jours de moins que la référence dans le Nord-Est de la France. Cette diminution devrait être plus limitée sur l'extrême Sud du pays.
- Une hausse des précipitations hivernales, de 0,1 à 0,85 [-0,19/+0,54] mm/jour selon les modèles et les scénarios (équivalent à un excédent de 9 à 76 mm en moyenne hivernale). Pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, le modèle Aladin-Climat simule une diminution en été comprise entre -0,16 et -0,38 [-0,7/0] mm/jour en moyenne sur le territoire métropolitain (soit environ 15 à 35 mm de moins en moyenne estivale). Pour ces mêmes scénarios, le modèle WRF simule une augmentation des précipitations de 0,15 à 0,32 mm/jour. Pour le scénario RCP2.6, le modèle Aladin-Climat simule une légère augmentation des précipitations estivales de 0,05 [-0,31/+0,14] mm/jour.
- Un renforcement du taux de précipitations extrêmes sur une large part du territoire, dépassant 5 % dans certaines régions avec le scénarios RCP8.5, mais avec une forte variabilité des zones concernées selon le modèle.
- Une augmentation des épisodes de sécheresse dans une large partie Sud du pays, mais pouvant s'étendre à l'ensemble du pays pour l'un des deux modèles.

4. Concernant les régions d'outre-mer

Pour les régions d'outre-mer, les simulations disponibles au moment de la rédaction de ce document ne sont issues que du modèle régional **Aladin-Climat**. Par conséquent, **aucune estimation d'incertitude** ne peut être effectuée. Par ailleurs, l'**absence de correction** avec les données d'observation implique également qu'un nombre limité de variables puisse être présenté, et exclut de fait les indices d'extrêmes. Nous nous penchons donc sur les projections climatiques en termes de température et précipitations moyennes pour les Antilles, la Polynésie Française, la Réunion et la Nouvelle Calédonie. De plus, une étude de l'impact du changement climatique sur les cyclones s'appuie sur l'expertise figurant dans le cinquième rapport du GIEC.

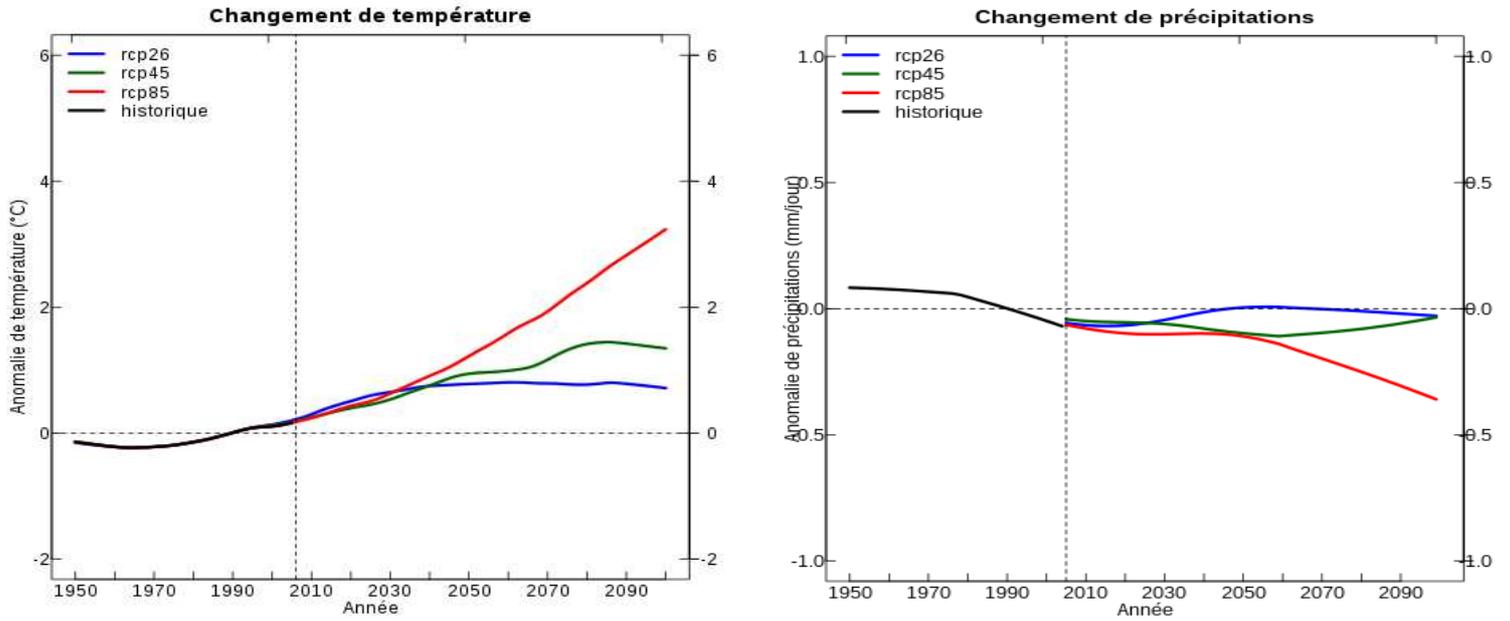
4.1. Changements de température et précipitations dans les régions d'outre-mer

Aux Antilles, le changement de température au cours du XXI^e siècle (en moyenne annuelle) est généralement moins marqué que sur la métropole. Durant la première moitié du siècle, l'écart de température par rapport à la référence 1976-2005 est similaire pour les trois scénarios RCP, qui montrent une augmentation de la température entre 0,8 et 1,2 °C à l'horizon 2050. Les écarts entre les scénarios se creusent durant la seconde moitié du siècle. Le scénario RCP2.6 montre une stabilisation de l'évolution de la température, dont l'anomalie se maintient à 0,7 °C en 2100. Le scénario RCP4.5 montre quant à lui un écart de température par rapport à la référence à hauteur de 1,4 °C en 2100. Cette hausse est plus marquée pour le scénario RCP8.5, avec une anomalie de 3 à 3,5 °C d'ici 2100.

Concernant l'évolution des précipitations, les résultats mettent généralement en évidence une diminution en moyenne annuelle, allant jusqu'à 0,3 mm/jour de moins que la référence en 2100. Ce diagnostic montre le changement moyen toutes saisons confondues, mais l'évolution est plus marquée si l'on sépare saison sèche et saison humide. En particulier, la diminution des précipitations est plus importante en saison sèche. De la même manière, la saison humide voit plutôt une légère augmentation du taux de précipitations (non montré).

Ces évolutions de température et précipitations projetées pour le XXI^e siècle sont comparables pour toutes les régions d'outre-mer. Des informations cartographiées pour chaque région sont disponibles sur le portail DRIAS.

ANTILLES



REUNION

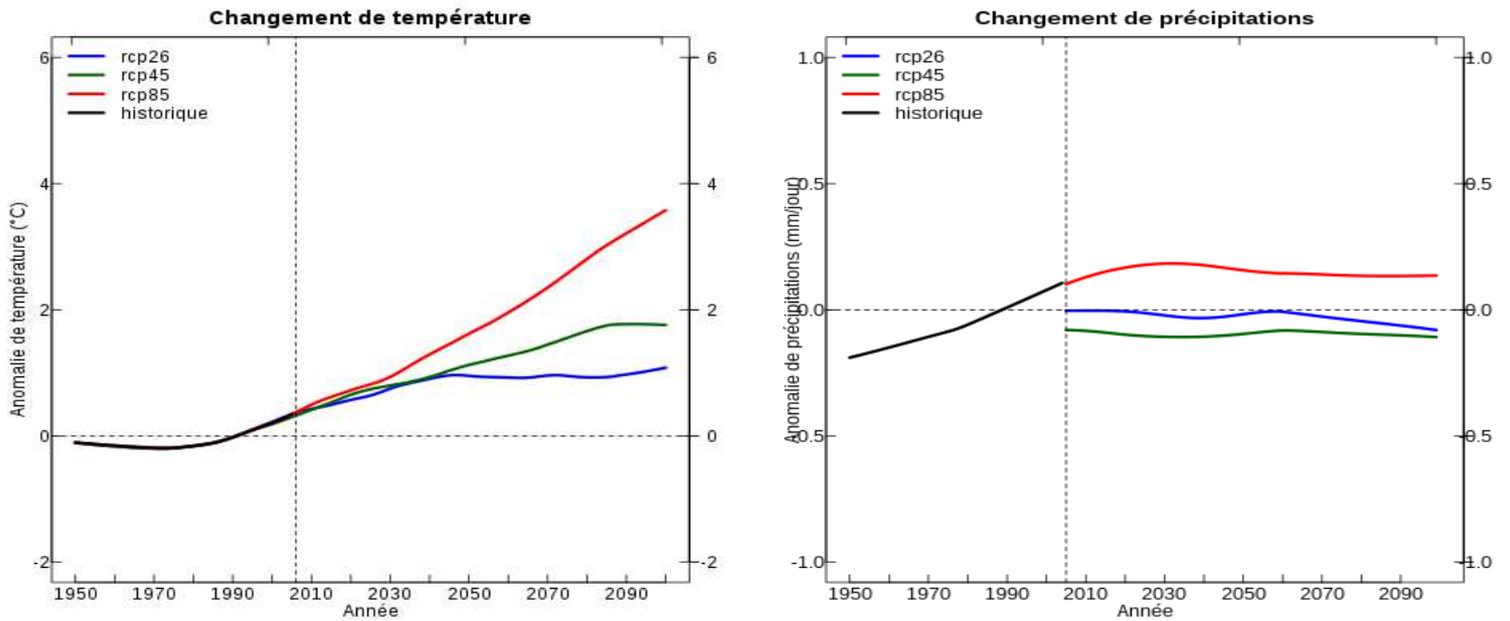
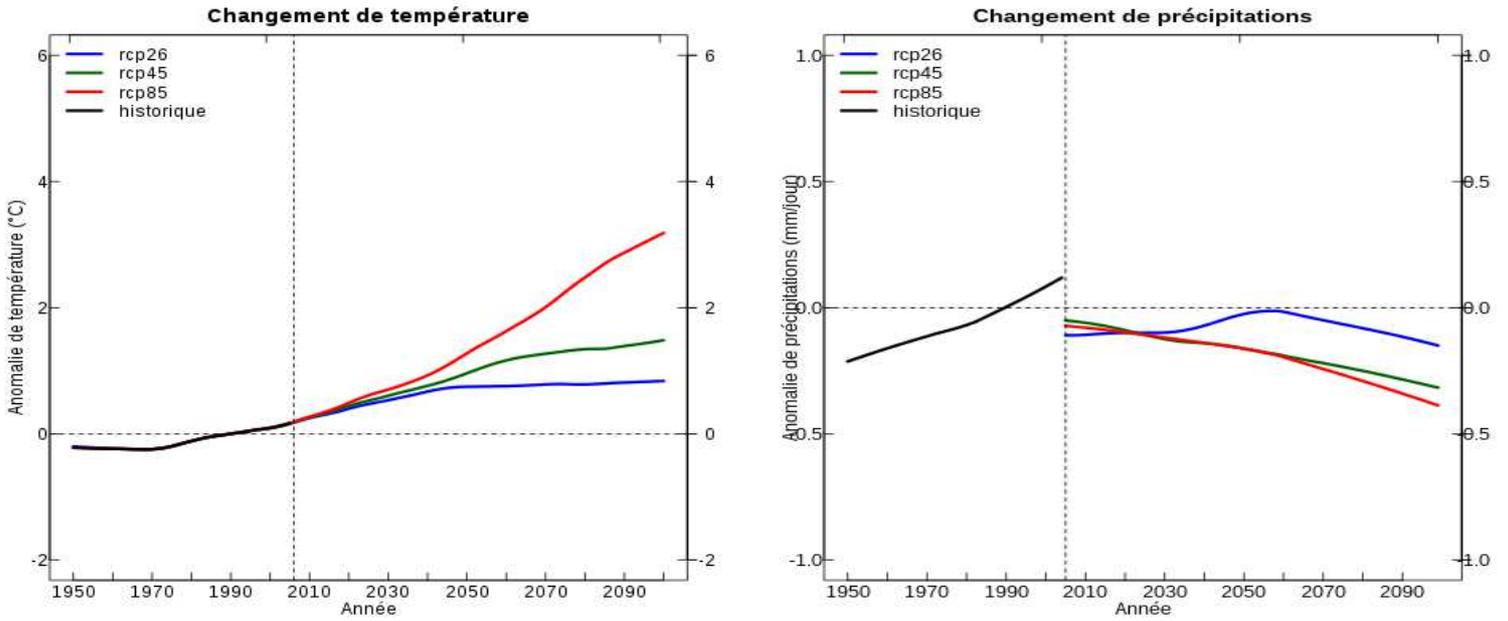


Figure 21: Evolution de la température (à gauche, en °C) et des précipitations (à droite, en mm/jour), relativement à la référence 1976-2005, pour les scénarios RCP2.6 en bleu, RCP4.5 en vert et RCP8.5 en rouge.

POLYNESIE : TAHITI



NOUVELLE CALEDONIE

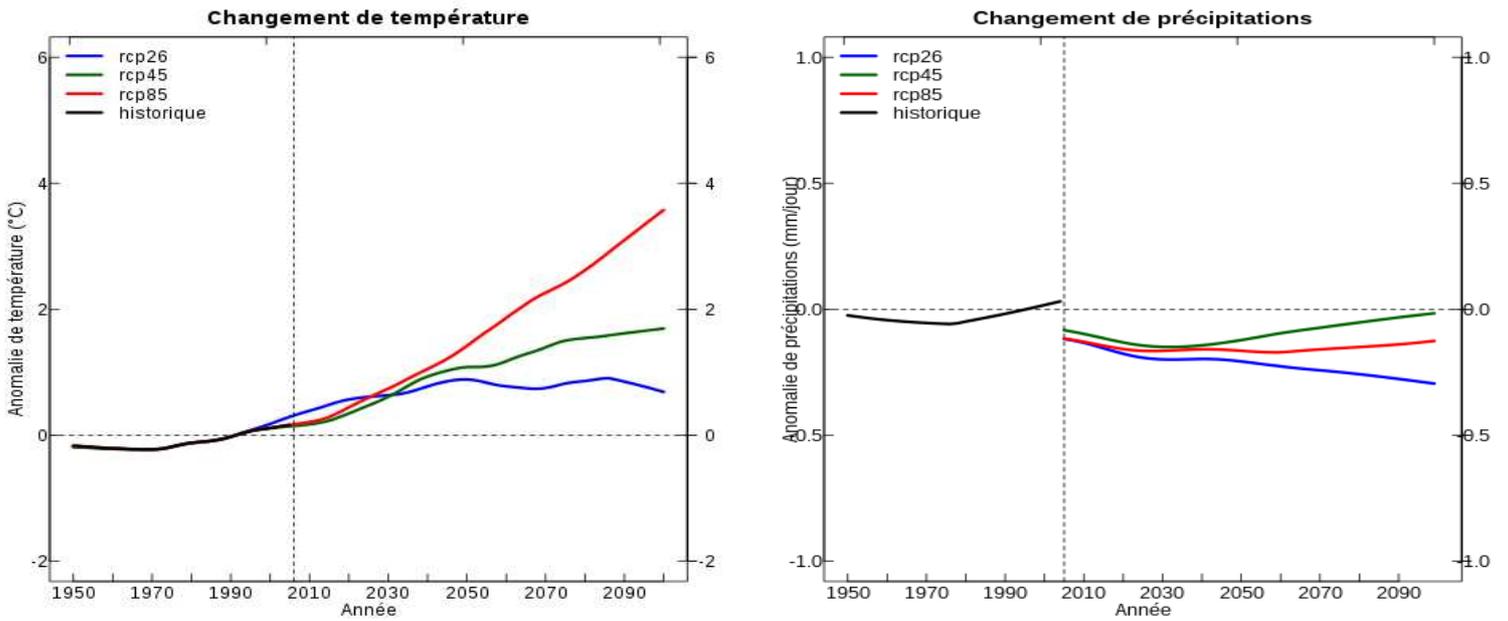


Figure 22: Evolution de la température (à gauche, en °C) et des précipitations (à droite, en mm/jour), relativement à la climatologie 1976-2005, pour les scénarios RCP2.6 en bleu, RCP4.5 en vert et RCP8.5 en rouge.

4.2. Impact sur l'activité cyclonique

Cette section vise à fournir quelques conclusions concernant l'évolution de l'activité cyclonique au cours du XXI^e siècle, en terme de fréquence d'occurrence et d'intensité. Elle s'appuie sur l'expertise figurant dans les chapitres 11 et 14 du volume 1 du 5^e rapport du GIEC.

Il en ressort qu'un **faible degré de confiance** est accordé à l'évolution des fréquences d'occurrence des cyclones tropicaux pour la **première moitié du XXI^e siècle** à l'échelle des bassins océaniques, suite au faible nombre d'études sur certains bassins, mais surtout à cause de l'incertitude liée à la variabilité interne à cet horizon. Toutefois, à cette échéance, les premières études mettent en évidence une **augmentation** de l'**intensité** des cyclones dans le bassin **Nord-Atlantique** (Knutson et al., 2013 ; Villarini and Vecchi, 2013) et une **augmentation** de la fréquence des cyclones de **catégories 4 et 5** dans les bassins **Nord-Atlantique** (Knutson et al., 2013) et **Pacifique Sud-Ouest** (Leslie et al., 2007).

En fin de siècle, il est probable (c'est à dire avec une probabilité supérieure à 66 %) que la **fréquence globale** des cyclones tropicaux **diminuera ou restera la même** (Knutson et al., 2010). Les précipitations moyennes et la vitesse moyenne du vent maximal associées aux cyclones tropicaux augmenteront probablement.

En résumé

changement climatique dans les régions d'outre-mer

1 Température et précipitations

Cette partie donne une première estimation des projections climatiques en termes de température et précipitations pour l'outre-mer (Antilles, Polynésie Française, Réunion et Nouvelle Calédonie). Les résultats, issus du modèle régional Aladin-Climat, mettent en évidence sur l'ensemble des régions :

- Une augmentation de la température à l'horizon 2100 de l'ordre de 0,7 °C pour le scénario RCP2.6 et de 3 à 3,5 °C pour le scénario RCP8.5.
- Une diminution des précipitations moyennes, en particulier pour la saison sèche.

2 Activité cyclonique

Nous nous appuyons ici sur l'expertise issue du dernier rapport du GIEC. Les résultats montrent :

- **En début de siècle** : Un faible degré de confiance est accordé à l'évaluation de l'évolution des fréquences d'occurrence des cyclones tropicaux. Quelques études seulement montrent une augmentation de l'intensité des cyclones dans le bassin Nord-Atlantique et une augmentation de la fréquence des cyclones de catégories 4 et 5 dans les bassins Nord-Atlantique et Pacifique Sud-Ouest.
- **En fin de siècle** : Il est probable que la fréquence globale des cyclones tropicaux diminuera ou restera la même. Les précipitations moyennes et la vitesse moyenne du vent maximal associées aux cyclones tropicaux augmenteront probablement.

5. Annexes

5.1. La correction des biais du modèle

Si l'on compare sur une période donnée, sur un espace donné, 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. Il est donc nécessaire dans certaines applications de corriger à posteriori les variables du modèle pour rendre la distribution statistique des données quotidiennes identique à la distribution observée en chaque point.

Dans le cas des simulations Aladin-Climat et WRF, les données **SAFRAN** (analyses météorologiques quotidiennes de température, précipitations et vent sur la France métropolitaines de Météo-France), disponibles sur une grille de **8x8 km²**, sont utilisées comme des observations de base (Quintana-Seguí et al., 2008). Les séries quotidiennes issues d'un point de grille du modèle sont corrigées en utilisant les données du point de grille le plus proche des analyses SAFRAN. La correction est appliquée selon la méthode de correction quantile/quantile (Déqué, 2007). Cette méthode consiste à corriger les valeurs des quantiles du modèle par ceux calculés à partir des observations. En chaque point du modèle, pour chaque variable météorologique quotidienne on calcule les 99 centiles des séries. On calcule de même les 99 centiles des séries observées. Chaque variable est corrigée indépendamment et au pas de temps quotidien. La fonction de correction consiste à **associer chaque centile du modèle au centile observé**. Pour toute valeur du modèle située entre deux centiles, on fait une interpolation linéaire. Au-delà du 99^{ème} et en deçà du 1^{er}, on applique une correction constante estimée sur le centile extrême correspondant. Cette méthode permet de **corriger les plus gros défauts du modèle** notamment en termes d'intensité **des phénomènes extrêmes** ou de **fréquence de jours pluvieux**. Cette méthode ne se contente pas de corriger les biais des valeurs moyennes des variables climatiques de la simulation de référence, mais elle corrige également les biais de leurs distributions statistiques en « ramenant » les fonctions de distribution des variables simulées vers les fonctions de distribution des observations. Les statistiques des événements calculés à partir des variables corrigées de la simulation de référence sont donc très proches des statistiques des événements observés. Les mêmes corrections sont aussi appliquées aux résultats des scénarios du climat futur en faisant l'hypothèse que les biais - c'est à dire les écarts aux observations liés aux erreurs du modèle - sur les distributions statistiques restent inchangés entre le climat actuel et le climat futur. Cette correction permet ainsi d'augmenter le degré de confiance dans l'estimation des moyennes et des extrêmes climatiques tirés des simulations du climat futur.

Comme pour le précédent rapport, pour chaque saison, les situations météorologiques de chaque jour sont préalablement classées en quatre régimes de temps caractéristiques du domaine Atlantique Nord-Europe. La correction est ensuite appliquée par saison et par régime de temps. Cette façon de procéder garantit que les fonctions de distribution des variables climatiques simulées seront proches des fonctions de distribution des observations, non seulement pour chaque saison, mais aussi pour chacun des quatre régimes de temps considérés. Cependant, comme la fréquence d'occurrence des régimes de temps peut ne pas être parfaitement simulée par rapport aux observations, cela ne garantit pas que, après correction, les fonctions de distribution complètes simulées seront aussi proches que

possible des fonctions de distribution complètes observées. Cet accord dépendra aussi du modèle considéré. Par contre, l'avantage de cette méthode est que l'hypothèse selon laquelle les biais sur les distributions statistiques restent inchangés entre le climat actuel et le climat futur, est dans ce cas faite pour un régime de temps donné. Cette hypothèse est plus satisfaisante dans la mesure où les biais des modèles sont dépendants des régimes de temps et que la fréquence des régimes est affectée par le changement climatique.

Les simulations de l'ensemble Euro-Cordex ont quant à elles été corrigées à partir des données SAFRAN en utilisant la méthode CDFt (Cumulative Distribution Function – Transfert). C'est une méthode statistique développée pour générer des fonctions de distribution cumulatives locales à partir de champs à grande échelle. Au lieu d'appliquer la correction quantile-quantile entre les données du modèle futur et les données des stations présentes on cherche ici à calculer directement une fonction cumulative de distribution pour les données futures (Michelangeli et al., 2009).

5.2. La descente d'échelle

5.2.1. Variabilité climatique globale et régionale

D'après le dernier rapport du GIEC (GIEC, 2013) « l'augmentation des températures moyennes à la surface du globe pour la période 2081–2100, relativement à 1986-2005, sera probablement dans les plages ... 0,3 °C à 1,7 °C (RCP2.6), 1,1 °C à 2,6 °C (RCP4.5), 1,4 °C à 3,1 °C (RCP6.0) et 2,6 °C à 4,8 °C (RCP8.5). » Mais il est aussi précisé que la température « continuera à présenter une variabilité inter-annuelle à décennale et ne sera pas uniforme d'une région à l'autre. »

Afin de mieux préciser le lien existant entre ces changements de température globaux et les changements présentés dans ce rapport pour la France, nous illustrons ci-dessous par deux figures l'évolution de la moyenne annuelle de la température à l'échelle mondiale et à l'échelle de la France métropolitaine sur la période 1900-2013. L'intervalle de représentation étant le même (écart à la moyenne de la période 1961-1990 compris entre $-1,5$ °C et $1,5$ °C), il apparaît clairement que la température est beaucoup plus variable à l'échelle de la France qu'à l'échelle mondiale. Cependant, la moyenne de cette température sur des périodes de 10 ans (traits continus noirs) montre que cette variabilité se superpose à une tendance de long terme (échelle de temps de plusieurs dizaines d'années) qui est beaucoup plus en accord entre l'échelle mondiale et l'échelle du pays (un peu plus forte en France).

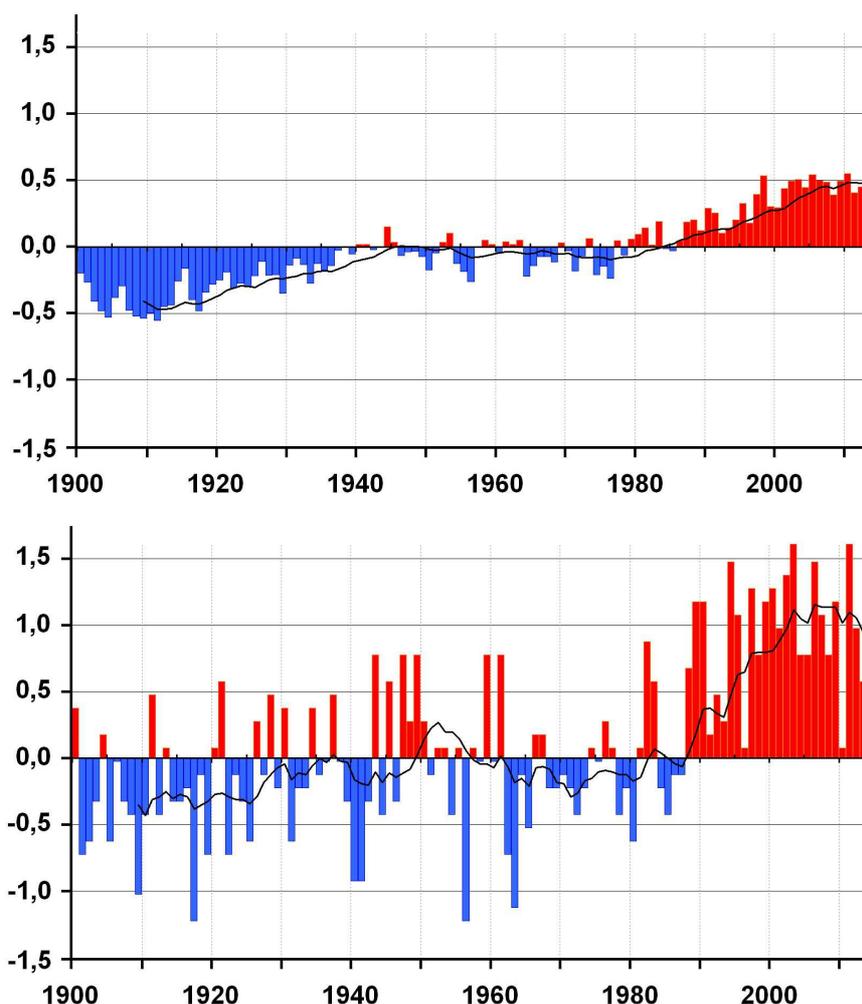


Figure 23: Anomalies de température moyenne annuelle entre 1900 et 2013 en moyenne à l'échelle de la planète (haut) et en moyenne à l'échelle de la France métropolitaine (bas). Ces anomalies représentent des différences par rapport aux moyennes correspondantes de la période 1961-1990 et sont exprimées en °C. Les traits continus noirs représentent l'évolution des moyennes décennales.

Ce qui est montré ici pour les données du passé s'applique aussi pour les changements climatiques calculés pour le futur. Les changements de température pour la fin du siècle liés aux effets des activités humaines sont du même ordre de grandeur à l'échelle de la planète et à l'échelle de la France (de quelques degrés). Mais, en particulier à l'échelle de la France, une importante variabilité inter-annuelle, d'origine naturelle, aléatoire et imprévisible masque le signal de changement climatique de long terme. C'est une des raisons pour lesquelles les changements sont rapportés à des moyennes sur des périodes de 30 ans qui gommement une part importante de cette variabilité. C'est aussi une des raisons pour lesquelles il est plus difficile de distinguer le signal de changement climatique pour le futur proche que pour le futur lointain.

5.2.2. Modélisation globale et régionale

Les études climatiques classiques se font à partir de modèles numériques appelés modèles de circulation générale (MCG) qui couvrent l'ensemble du globe, représentent la dynamique de l'atmosphère et ses lois physiques. La tendance actuelle quand on étudie le climat global de la planète est de coupler ces modèles atmosphériques à des modèles représentant les autres parties du système climatique comme l'océan, la végétation, les fleuves, ou encore la chimie atmosphérique. La résolution de ces MCG est généralement de l'ordre de quelques centaines de kilomètres, et ne permet donc pas de représenter les processus qui influencent le climat à une échelle plus régionale. De nombreuses questions liées au changement climatique nécessitent pourtant de réduire l'échelle d'espace décrite par les simulations. En particulier, les **études d'impact** impliquent que les données climatiques soient simulées à une **échelle plus fine** que la résolution actuelle des modèles de grande échelle des simulations climatiques. Pour cela, les méthodes de descente d'échelle (ou désagrégation d'échelle) permettent de descendre à des échelles de l'ordre de la **dizaine de kilomètres**.

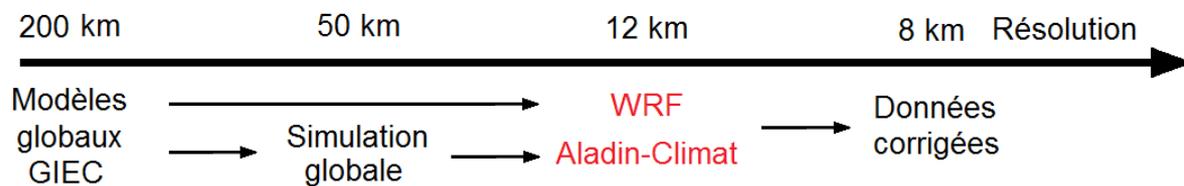
Deux approches existent en matière de méthodes de descente d'échelle :

- **L'approche dynamique** consiste à résoudre explicitement la physique et la dynamique du système climatique régional. Elle utilise pour cela des modèles climatiques régionaux, qui sont de même nature que les modèles atmosphériques ou océaniques utilisés pour les simulations du GIEC, mais ils ont l'avantage de décrire des phénomènes de plus petites dimensions grâce à leur résolution spatiale plus fine sur la région d'intérêt.
- **L'approche statistique** repose sur la recherche d'une relation statistique entre les variables de grande échelle et les variables locales de surface. Elle se base sur le fait que le climat régional dépend de deux facteurs : le climat de grande échelle et les caractéristiques locales ou régionales telles que la topographie, le type de surface, la couverture de végétation...

Ce rapport se base sur l'utilisation de **simulations régionales** obtenues par la descente d'échelle dynamique. Cette réduction d'échelle résolue permet de préciser à l'échelle de l'Europe, de la France, voire d'une région française, les changements climatiques auxquels on peut s'attendre. Elle permet aussi d'améliorer le lien entre les changements climatiques planétaires et les impacts régionaux, et de mieux reproduire l'évolution des événements extrêmes. Les modèles climatiques régionaux restent néanmoins dépendants des modèles climatiques de grande échelle. En effet, des scénarios d'évolution des océans et des glaces extraits des simulations globales servent de données d'entrée aux simulations régionales. De plus, les simulations globales servent aussi à définir les conditions aux frontières latérales des domaines couverts par les modèles régionaux.

La régionalisation des simulations climatiques globales de départ a été effectuée en deux étapes. Dans un premier temps, des simulations climatiques ont été réalisées à partir des **modèles couplés océan-atmosphère globaux** (d'une résolution de l'ordre de 200 km) de l'IPSL et du CNRM tels qu'utilisés pour l'exercice du **GIEC**. Dans le cas du modèle WRF, les sorties du modèle global sont directement utilisées pour déterminer les conditions aux limites (limites du domaine et températures de surface de la mer) du modèle régional. Dans le cas d'Aladin-Climat, une étape intermédiaire a été effectuée consistant à corriger les températures de surface de la mer simulées par le modèle couplé de leurs biais systématiques, puis de réaliser une simulation du climat global à 50km de résolution utilisée pour contraindre la simulation climatique régionale. Cette procédure

permet ainsi de passer de manière plus continue de la résolution la plus basse utilisée pour les simulations globales des rapports du GIEC à la résolution de **12 km** de nos simulations.



5.3. Les extrêmes climatiques

5.3.1. Indices de température

- **Nombre de jours de vague de chaleur**

Une vague de chaleur est définie comme une période anormalement chaude durant plus de cinq 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 comptant que les jours appartenant à une série de plus de cinq jours chauds consécutifs. Pour obtenir cette valeur de référence pour chaque jour de l'année, on calcule le cycle annuel moyen de la température maximale quotidienne simulée pour la période de référence (1976-2005), en effectuant une moyenne glissante sur cinq jours de ce cycle annuel.

- **Nombre de jours à température anormalement basse**

Cet indice permet de quantifier l'occurrence de périodes anormalement froides (en comparaison de la climatologie) en comptant le nombre de jours pour lesquels la température minimale quotidienne est inférieure de plus de 5 °C à une valeur de référence. Le calcul de cette valeur de référence se fait de la même manière que pour le nombre de jours de vague de chaleur, mais à partir de la température minimale quotidienne.

5.3.2. Indices de précipitation

Les indices de précipitation se calculent à partir des précipitations quotidiennes simulées, représentant pour chaque jour le cumul de la pluie et de la neige. L'unité des précipitations est en kg/m²/jour en sortie des modèles, mais en considérant une densité constante des précipitations égale à celle de l'eau liquide, cette unité est équivalente à des mm/jour ou l/m²/jour (1 kg d'eau, donc 1 litre d'eau, représente une hauteur d'eau de 1 mm répartie sur une surface de 1 m²).

- **Pourcentage de précipitations extrêmes**

Pour caractériser la réponse des précipitations extrêmes au changement climatique, on utilise la fraction des précipitations au-dessus du 90^e centile. Par exemple, le 90^e centile annuel est calculé en classant pour chaque année les 365 (ou 366) valeurs quotidiennes de précipitations dans l'ordre croissant, le 90^e centile représentant la valeur au-dessus de laquelle se trouvent les 10 % de valeurs les plus élevées (soit la 328^e valeur). En calculant le cumul sur toute l'année, on obtient une fraction nous donnant la part des événements de fortes précipitations sur le total des précipitations annuelles. Cet indice compris entre 0 et 1

n'a pas d'unité. On peut toutefois le multiplier par 100 pour exprimer les résultats en pourcentages.

- **Périodes de fortes sécheresses**

La définition d'une sécheresse est assez complexe car elle dépend du domaine considéré et du point de vue dans lequel on se place. On peut en effet distinguer quatre grands types de sécheresses: météorologique, hydrologique, agricole ou encore socio-économique. Un événement sec peut être considéré comme une forte sécheresse dans un de ces domaines sans forcément l'être pour les autres (exemple: pour un agriculteur, un déficit de précipitations à une certaine période de l'année peut être néfaste sans pour autant que le sol soit suffisamment sec pour correspondre à une sécheresse du point de vue hydrologique). 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 comme sec si les précipitations quotidiennes lui correspondant n'ont pas excédé 1 mm.

5.3.3. Indice de vent violent

Afin de caractériser les changements d'intensité des vents les plus violents, nous donnons ici les valeurs du vent maximal en hiver. Cet indice est exprimé en km/h. Ce vent est un vent moyen sur un pas de temps du modèle utilisé (typiquement de quelques dizaines de minutes) et ne tient donc pas compte des rafales.

6. Liste d'acronymes

ALADIN : Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational

C25 : 25^e centile d'un échantillon de données

C75 : 75^e centile d'un échantillon de données

CDFt : Cumulative Distribution Function – Transfert

CMIP : Coupled Model Intercomparison Project

CNRM : Centre National de Recherches Météorologiques

CORDEX : Cordinated Regional Downscaling Experiment

DRIAS : Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnement

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

IPSL : Institut Pierre Simon Laplace

INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

MCG : Modèle de Circulation Générale

RCM : Regional Climate Modeling

RCP : Representative Concentration Pathway

SRES : Special Report on Emissions Scenarios

WRF : Weather Research and Forecasting Model

7. Glossaire

Anthropique

Produit ou causé par les activités humaines.

Aérosol

Particule solide ou liquide en suspension dans l'air, dont la taille varie généralement de quelques

nanomètres à dix micromètres et qui séjourne dans l'atmosphère plusieurs heures au moins. Les aérosols peuvent être d'origine naturelle ou humaine (*anthropique*).

Centiles

En statistique descriptive, un centile est chacune des 99 valeurs qui divisent les données d'un échantillon triées en 100 parts égales, de sorte que chaque partie représente 1/100 de l'échantillon de population. Ainsi le 1^{er} centile (ou « centile 1 ») sépare le 1 % inférieur des données, et le 99^e centile (ou « centile 99 ») sépare les 99 % inférieurs des données de l'échantillon.

Changement climatique

Variation de l'état du *climat*, qu'on peut déceler (par exemple au moyen de tests statistiques) par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus. Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes naturels ou à des forçages externes, notamment les modulations des cycles solaires, les éruptions volcaniques ou des changements *anthropiques* persistants dans la composition de l'atmosphère ou dans l'utilisation des terres.

Climat

Au sens étroit du terme, le climat désigne en général le temps moyen ou, plus précisément, se réfère à une description statistique fondée sur les moyennes et la variabilité de grandeurs pertinentes sur des périodes variant de quelques mois à des milliers, voire à des millions d'années (la période type, définie par l'Organisation météorologique mondiale, est de 30 ans). Ces grandeurs sont le plus souvent des variables de surface telles que la température, la hauteur de précipitation et le vent. Dans un sens plus large, le climat désigne l'état du *système climatique*, y compris sa description statistique.

Descente d'échelle (ou régionalisation)

Méthode permettant, à partir de simulations climatiques de grande échelle (de l'ordre de 300 à 50 km), de descendre à des échelles fines de l'ordre de la dizaine de kilomètres, et/ou de corriger les résultats des simulations à partir d'observations.

Effet de serre

Effet radiatif de tous les constituants de l'atmosphère qui absorbent le rayonnement infrarouge. Les *gaz à effet de serre*, les nuages et, dans une moindre mesure, les *aérosols* absorbent le rayonnement terrestre émis à la surface de la Terre et dans l'atmosphère. Ces constituants émettent un rayonnement infrarouge dans toutes les directions, mais, toutes choses étant égales par ailleurs, la quantité nette de rayonnement émis vers l'espace est alors inférieure que ce qu'elle aurait pu être en l'absence de ces constituants, compte tenu de la baisse de la température avec l'altitude dans la

troposphère et de l'affaiblissement de l'émission qui en découle. L'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre accroît cet effet; on fait parfois référence à cette différence en utilisant l'expression effet de serre additionnel. L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre découlant d'émissions anthropiques se traduit par un *forçage radiatif*. La surface terrestre et la troposphère se réchauffent en réponse à ce forçage, rétablissant graduellement l'équilibre radiatif au sommet de l'atmosphère.

Forçage radiatif

Exprimé en W/m^2 , un forçage radiatif est un changement du bilan radiatif (différence entre le rayonnement descendant et le rayonnement montant) au sommet de la troposphère (situé entre 9 et 16 km d'altitude environ) ou de l'atmosphère, dû à un changement d'un des facteurs d'évolution du climat – comme la concentration des *gaz à effet de serre*.

Gaz à effet de serre

Constituants gazeux de l'atmosphère, tant naturels qu'*anthropiques*, qui absorbent et émettent un rayonnement à des longueurs d'onde données du spectre du rayonnement terrestre émis par la surface de la Terre, l'atmosphère et les nuages. C'est cette propriété qui est à l'origine de l'*effet de serre*. La vapeur d'eau (H_2O), le dioxyde de carbone (CO_2), l'oxyde nitreux (N_2O), le méthane (CH_4) et l'ozone (O_3) sont les principaux gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère terrestre.

Incertitude

Degré de connaissance incomplète pouvant découler d'un manque d'information ou d'un désaccord sur ce qui est connu, voire connaissable. L'incertitude peut avoir des origines diverses et résulter ainsi d'une imprécision dans les données, d'une ambiguïté dans la définition des concepts ou de la terminologie employés ou encore de *projections* incertaines du comportement humain. L'incertitude peut donc être représentée par des mesures quantitatives ou par des énoncés qualitatifs (reflétant par exemple l'opinion d'une équipe d'experts).

Médiane

En statistique descriptive, la médiane est la valeur centrale qui partage un échantillon de données en deux groupes de même effectif : 50 % au-dessus et 50 % en dessous. La médiane peut avoir une valeur différente de la moyenne.

Modèle à aire limitée

Modèle atmosphérique à haute résolution sur une zone géographiquement restreinte, forcé à ses frontières par les sorties d'un *Modèle climatique* de Circulation Générale (MCG).

Modèle climatique

Représentation numérique du *système climatique* fondée sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ses composantes et leurs processus d'interaction et de rétroaction, et qui tient compte d'une partie de ses propriétés connues. Les modèles de circulation générale couplés fournissent une représentation d'ensemble du système climatique, qui est une des plus complètes du spectre actuellement disponible. Un modèle de climat régional est un modèle climatique de *résolution* relativement plus élevée pour une zone restreinte.

Prévision climatique

Une prévision climatique est le résultat d'une tentative d'estimation (à partir d'un état donné du *système climatique*) de l'évolution réelle du *climat* à l'avenir, par exemple à l'échelle d'une saison, de plusieurs années voire d'une décennie. Comme il est possible que l'évolution future du *système climatique* soit fortement influencée par les conditions initiales, de telles prévisions sont, en général, de nature probabiliste.

Projection climatique

Simulation de la réponse du *système climatique* à un scénario futur d'émissions ou de concentration de *gaz à effet de serre* et d'*aérosols*, obtenue généralement à l'aide de *modèles climatiques*. Les projections climatiques se distinguent des *prévisions climatiques* par le fait qu'elles sont fonction des *scénarios d'émissions*, de concentration ou de *forçage radiatif* utilisés, qui reposent sur des hypothèses concernant, par exemple, l'évolution socio-économique et technologique à venir, ces hypothèses pouvant se réaliser ou non.

Quantile

Le quantile est une généralisation de la notion de médiane qui divise la distribution d'un échantillon de données en deux parties égales. On définit notamment les quartiles, déciles et centiles sur la population, ordonnée dans l'ordre croissant, que l'on divise en 4, 10 ou 100 parties de même effectif. On parlera ainsi du « centile 90 » pour indiquer la valeur séparant les premiers 90 % de la population des 10 % restants.

Quantile-quantile (Correction)

Méthode de correction permettant de corriger le biais d'une simulation climatique. Cette méthode consiste à corriger les valeurs des quantiles calculés par le modèle par ceux issus des observations. En chaque point du modèle, pour chaque variable météorologique, les 99 centiles des séries quotidiennes sont calculés. Il en est de même pour les séries observées. La fonction de correction associe chaque centile du modèle au centile observé. Ainsi toute la distribution statistique d'une variable météorologique simulée est corrigée quantile par quantile, étant donné le biais pour chaque

quantile établi sur le climat présent.

Résolution

Appliqué aux *modèles climatiques*, le terme se rapporte à la distance physique (mètres ou degrés) séparant les points de la grille auxquels les équations sont résolues. La résolution temporelle se rapporte au pas de temps ou à la durée écoulée entre chaque nouveau calcul des équations par le modèle.

SAFRAN

SAFRAN est un système d'analyse à méso-échelle de variables atmosphériques près de la surface. Il utilise des observations de surface, combinées à des données d'analyse de modèles météorologiques pour produire au pas de temps horaire les variables suivantes: température, humidité, vent, précipitations solides et liquides, rayonnement solaire et infrarouge incident. Ces variables sont analysés par pas de 300m d'altitude. Ils sont ensuite interpolés sur une grille de calcul régulière (8 x 8 km).

Scénario climatique

Représentation vraisemblable et souvent simplifiée du *climat* futur, fondée sur un ensemble intrinsèquement cohérent de relations climatologiques et établie expressément pour déterminer les conséquences possibles des *changements climatiques anthropiques*, qui sert souvent à alimenter les modèles d'impact. Les *projections climatiques* servent fréquemment de matière première aux scénarios climatiques, quoique ces derniers nécessitent généralement des informations supplémentaires, par exemple sur le climat actuel observé. Un scénario du changement climatique correspond à la différence entre un scénario climatique et le climat actuel.

Scénario d'émissions

Représentation plausible de l'évolution future des émissions de substances susceptibles d'avoir des effets radiatifs (*gaz à effet de serre, aérosols, etc.*), fondée sur un ensemble cohérent et homogène d'hypothèses relatives aux éléments moteurs (évolution démographique et socio-économique, progrès technologique, etc.) et à leurs interactions principales. Les scénarios de concentration, découlant des scénarios d'émissions, servent de données initiales aux *modèles climatiques* pour le calcul des *projections climatiques*.

Système climatique

Système extrêmement complexe comprenant cinq grands éléments: l'atmosphère, l'hydrosphère, (eaux superficielles et souterraines liquides, telles que les océans, les mers, les cours d'eau, ...) la cryosphère (eau à la surface ou sous la surface se présentant sous une forme solide, comprenant les

glaces en mer, le manteau neigeux, les glaciers et les nappes glaciaires, ...), la lithosphère (partie externe solide du globe terrestre) et la biosphère (partie du système terrestre comprenant tous les écosystèmes et organismes vivants), et qui résulte de leurs interactions.

Variabilité climatique

Variations de l'état moyen et d'autres variables statistiques (écarts-types, extrêmes, etc.) du *climat* à toutes les échelles spatiales et temporelles au-delà de la variabilité propre à des phénomènes météorologiques particuliers. La variabilité peut être due à des processus internes naturels au sein du *système climatique* (variabilité interne) ou à des variations des forçages externes *anthropiques* ou naturels (variabilité externe).

8. Références bibliographiques

Déqué, M., 2007 : Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57(1), 16-26, doi: 10.1016/j.gloplacha.2006.11.030.

GIEC, 2013 : Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Hawkins, E., and R. Sutton, 2009 : The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(8), 1095-1107, doi: 10.1175/2009BALS2607.1.

Jacob, D., J. Peterson, B. Eggert, A. Alias, O.B. Christensen, L.M. Bouwer, A. Braun, et al., 2014 : EURO-CORDEX: New High-Resolution Climate Change Projections for European Impact Research. *Regional Environmental Change*, 1-16, doi: 10.1007/s10113-013-0499-2.

Knutson, T.R, J.L. McBride, J. Chan, K. Emanuel, G. Holland, C. Landsea, I. Held, J.P. Kossin, A.K. Srivastava and M. Sugi, 2010 : Tropical Cyclones and Climate Change. *Nature Geoscience*, 3(3), 157–163, doi: 10.1038/ngeo779.

Knutson, T.R., J.J. Sirutis, G. A. Vecchi, S. Garner, M. Zhao, K. Hyeong-Seog, M. Bender, R. E. Tuleya, I. M. Held and G. Villarini, 2013 : Dynamical Downscaling Projections of Twenty-First-Century Atlantic Hurricane Activity: CMIP3 and CMIP5 Model-Based Scenarios. *Journal of Climate*, 26(17).

Kotlarski, S., K. Keuler, O. B. Christensen, A. Colette, M. Déqué, A. Gobiet, K. Goergen, D. Jacob, D. Lüthi, E. van Meijgaard, G. Nikulin, C. Schär, C. Teichmann, R. Vautard, K. Warrach-Sagi, V. Wulfmeyer, 2014: Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geoscientific Model Development*, 7, 1297-1333, doi:10.5194/gmd-7-1297-2014, 2014.

Leslie, L. M., D. J. Karoly, M. Leplastrier, and B. W. Buckley, 2007 : Variability of tropical cyclones over the southwest Pacific Ocean using a high-resolution climate model. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 97(1-4), 171–180, doi: 10.1007/s00703-006-0250-3.

Michelangeli, P.-A., M. Vrac and H. Loukos, 2009 : Probabilistic downscaling approaches: Application to wind cumulative distribution functions. *Geophysical Research Letters*, 36, L11708,

doi:10.1029/2009GL038401.

Moss, R. H., J. A. Edmonds, K.A. Hibbard, M.R. Manning, S.K. Rose, D. P. van Vuuren, T.R. Carter, et al., 2010 : The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747–56, doi: 10.1038/nature08823.

Peings, Y., M. Jamous, S. Planton, et H. Le Treut, 2011 : Scénarios climatiques : indices sur la France métropolitaine pour les modèles français ARPEGE-Climat et LMDZ et quelques projections pour les DOM-COM. Le climat de la France au XXI^e siècle, Volume 1, rapport de la mission Jean Jouzel, janvier 2011, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, 139 pp.

Peings, Y., M. Jamous, S. Planton, et H. Le Treut, M. Déqué, H. Gallée, L. Li, 2012 : Scénarios régionalisés. Le climat de la France au XXI^e siècle, Volume 2, rapport de la mission Jean Jouzel, février 2012, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, 303 pp.

Quintana-Seguí, P., P. Le Moigne, Y. Durand, E. Martin, F. Habets, M. Baillon, C. Canellas, L. Franchisteguy, S. Morel, 2008 : Analysis of near-Surface atmospheric variables: Validation of the SAFRAN analysis over France. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 47(1), 92-107, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2007JAMC1636.1>.

Vautard, R., A. Gobiet, D. Jacob, M. Belda, A. Colette, M. Déqué, J. Fernández, M. García-Díez, K. Goergen, I. Güttler, T. Halenka, T. Karakostas, E. Katragkou, K. Keuler, S. Kotlarski, S. Mayer, E. van Meijgaard, G. Nikulin, M. Patarčić, J. Scinocca, S. Sobolowski, M. Suklitsch, C. Teichmann, K. Warrach-Sagi, V. Wulfmeyer, P. Yiou, 2013 : The simulation of European heat waves from an ensemble of regional climate models within the EURO-CORDEX project. *Climate Dynamics*, 41, 2555-2575, doi : 10.1007/s00382-013-1714-z.

Villarini, G., and G. A. Vecchi, 2013: Projected Increases in North Atlantic Tropical Cyclone Intensity from CMIP5 Models. *J. Climate*, **26**, 3231-3240..

9. Références de projets

Portail DRIAS : <http://www.drias-climat.fr/>

Projet CMIP5 : http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/data_portal.html

Projet Euro-Cordex : <http://www.euro-cordex.net/EURO-CORDEX.1908.0.html>

Programme GICC : <http://www.gip-ecofor.org/gicc/?q=node/311>

