

## **Rapporto sull'evoluzione del clima recente e sui potenziali impatti dei cambiamenti climatici per il territorio del Programma**

## **Rapport sur l'évolution du climat récent et sur les impacts potentiels du changement climatique sur le territoire du programme**

**Prodotto T2.3.1  
Progetto Interreg IT-FR  
MED-Star  
Strategie e misure per la  
mitigazione del rischio di  
incendio nell'area Mediterranea**

**Produit T2.3.1  
Projet Interreg IT-FR  
MED-Star  
Stratégies et mesures  
d'atténuation des risques  
d'incendie dans la région  
méditerranéenne**

Aprile 2021

Avril 2021



## Résumé

<b>Auteurs - Autori</b> .....	2
<b>Avec la collaboration de - Con la collaborazione di</b> .....	2
<b>Introduction - Introduzione</b> .....	3
<b>Messages clés - Messaggi chiave</b> .....	6
<b>Le climat récent</b> .....	8
<b>Sardaigne</b> .....	10
<b>Toscane</b> .....	12
<b>Ligurie</b> .....	14
<b>Corse</b> .....	16
<b>PACA</b> .....	20
<b>Les changement climatique attendu</b> .....	23
<b>Changement climatique attendu</b> .....	25
<b>Sardaigne, Toscane, Ligurie</b> .....	25
<b>Corse et Région PACA</b> .....	27
<b>Les impacts potentiels du changement climatique sur les feux de forêt</b> .....	35
<b>Références bibliographiques - Riferimenti bibliografici</b> .....	45
<b>Sitographie - Sitografia</b> .....	46

## Auteurs - Autori

Valentina Bacciu – Fondazione CMCC

Valentina Mereu – Fondazione CMCC

Costantino Sirca - UNISS

Josè Costa Saura - UNISS

Claudio Ribotta - UNISS

Donatella Spano - UNISS

## Avec la collaboration de - Con la collaborazione di

Andrea Motroni – ARPA Sardegna

Simone Cristofori – Consorzio LAMMA

Laura Carlon – Région SUD, Direction de l'Agriculture, de la Forêt et de l'Eau

Virginie Tihay-Felicelli – UNICORTE

Antonella Massaiu - ONF

## Introduction - Introduzione

Gli ultimi rapporti del Gruppo Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici (IPCC, 2018, 2014) confermano inequivocabilmente il fenomeno dei cambiamenti climatici in atto. La temperatura media globale osservata è di circa 1°C superiore rispetto ai livelli dell'era preindustriale e gli effetti sono già visibili. La regione Mediterranea, considerata uno degli "hot spot" del cambiamento climatico, ha registrato un riscaldamento che supera del 20% l'incremento medio globale e una riduzione delle precipitazioni in contrasto con l'aumento generale del ciclo idrologico nelle zone temperate comprese tra i 30° N e 46° N di latitudine (Lionello and Scarascia, 2018). In Italia si è osservato un aumento, a livello nazionale, del valore normale della temperatura media di 0.4°C dal 1961-1990 al 1971-2000, di 0.3°C dal 1971-2000 al 1981-2010. La stima aggiornata del rateo di variazione della temperatura media dal 1981 al 2019 è di  $+0.38 \pm 0.05^\circ\text{C}/10$  anni<sup>1</sup>, con otto dei dieci anni più caldi della serie storica registrati dal 2011. Anche in Francia l'evoluzione della temperatura media mostra una tendenza al riscaldamento. Il ritmo di questo aumento accelera in maniera significativi dagli anni '80. La tendenza osservata sul periodo 1959-2009 è di circa 0.3°C per decennio. Sempre in Francia, i tre anni più caldi (2014, 2011 e 2015) sono stati osservati negli ultimi cinque anni<sup>2</sup>.

L'andamento storico delle precipitazioni cumulate dalla metà del secolo scorso mostra invece un'elevata variabilità su scala

Les derniers rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2014, 2018) confirment sans équivoque le phénomène du changement climatique. La température moyenne mondiale observée est d'environ 1 ° C plus élevée que les niveaux de l'ère préindustrielle et les effets sont déjà visibles. La région méditerranéenne, considérée comme l'un des «points chauds» du changement climatique, a enregistré un réchauffement qui dépasse l'augmentation moyenne mondiale de 20% et une réduction des précipitations en contraste avec l'augmentation générale du cycle hydrologique dans les zones tempérées entre Latitude 30° N et 46° N (Lionello et Scarascia, 2018). En Italie, il y a eu augmentation, au niveau national, de la valeur normale de la température moyenne de 0.4°C de 1961-1990 à 1971-2000, de 0.3°C de 1971-2000 à 1981-2010. L'estimation mise à jour du taux moyen de variation de température de 1981 à 2019 est de  $+0.38 \pm 0.05^\circ\text{C}/10$  ans. Même en France, l'évolution de la température moyenne montre une tendance au réchauffement. Le rythme de cette augmentation s'est considérablement accéléré depuis les années 80. La tendance observée sur la période 1959-2009 est d'environ 0.3°C par décennie. Toujours en France, les trois années les plus chaudes (2014, 2011 et 2015) ont été observées au cours des cinq dernières années.

La tendance historique des précipitations accumulées depuis le milieu du siècle

<sup>1</sup> [https://www.isprambiente.gov.it/files2020/pubblicazioni/stato-ambiente/rapporto\\_clima\\_2019-1.pdf](https://www.isprambiente.gov.it/files2020/pubblicazioni/stato-ambiente/rapporto_clima_2019-1.pdf)

<sup>2</sup> <http://www.grec-sud.fr/cahier-thematique/le-cahier-climat/#art-234>

italiana con una diminuzione più marcata rilevata a cavallo tra gli anni 80 e 90. In Francia, a scala nazionale, le precipitazioni annuali non hanno mostrato alcun cambiamento significativo dal 1959. Tuttavia, sono caratterizzate da una netta disparità con un aumento su un'ampia metà dell'area settentrionale (in particolare la zona nord-orientale) e una diminuzione al sud (soprattutto nel sud-est).

I primi decenni del XXI hanno visto alcuni degli eventi di incendi più catastrofici in termini di impatti sulla società. I cambiamenti osservati sull'andamento del regime (Turco et al 2016; Spano et al., 2014) degli incendi sono dovuti principalmente a due fattori: (i) da una parte le condizioni meteo/climatiche in un contesto di riscaldamento globale, e (ii) dall'altra una maggior predisposizione agli incendi del territorio dovuta ai cambiamenti nell'uso e nella copertura del suolo avvenuti durante il XX secolo. Gli eventi meteorologici estremi come i prolungati periodi siccitosi e il susseguirsi di ondate di calore hanno facilitato il verificarsi di incendi con comportamento estremo e mettono a dura prova la capacità dei programmi di protezione dagli incendi boschivi incentrati sulle attività di lotta e spegnimento. La situazione attuale potrà essere ulteriormente inasprita dalle variazioni attese del clima. Infatti, come riporta anche l'IPCC (2019), i cambiamenti climatici "stanno giocando un ruolo sempre maggiore nel determinare i regimi degli incendi insieme con le attività umane". D'altra parte, il livello del rischio dei nuovi regimi di incendio guidati dai cambiamenti globali dipende anche dall'aumento della vulnerabilità della società europea ai disturbi dovuti agli incendi e da come la popolazione, lo sviluppo tecnologico e la gestione del territorio evolveranno.

dernier, en revanche, montre une forte variabilité à l'échelle italienne avec une diminution plus marquée enregistrée au tournant des années 80 et 90.

En France, à l'échelle nationale, la pluviométrie annuelle n'a pas connu de changement significatif depuis 1959. Cependant, elle se caractérise par une forte disparité avec une augmentation sur une large moitié nord (en particulier le quart nord-est) et une diminution au sud (en particulier en le sud-est).

Les premières décennies du 21e ont vu certains des événements d'incendie les plus catastrophiques en termes d'impact sur la société. Les changements évidents sur l'évolution du régime des feux (Turco et al 2016; Spano et al., 2014) sont principalement dus à deux facteurs: d'une part les conditions météorologiques / climatiques dans un contexte de réchauffement climatique, et les changements d'occupation et d'occupation des sols au cours du XXe siècle. Des événements météorologiques extrêmes tels que des sécheresses prolongées et des vagues de chaleur successives ont facilité la survenue d'incendies de forêt avec un comportement extrême et pèsent sur la capacité des programmes de protection contre les incendies de forêt axés sur les activités de lutte et d'extinction. La situation actuelle pourrait être encore exacerbée par les changements climatiques attendus. En fait, comme le rapporte également le GIEC (2019), le changement climatique "joue un rôle de plus en plus important dans la détermination des régimes d'incendies et des activités humaines". D'autre part, le niveau de risque des nouveaux régimes d'incendie induits par les changements globaux dépend également de l'augmentation de la vulnérabilité de la

Gli impatti dei cambiamenti climatici sulle variazioni del regime degli incendi (in termini di pericolosità, rischio, insorgenza e propagazione) vengono analizzati e valutati attraverso l'integrazione di strumenti modellistici con le proiezioni future derivanti da Modelli di Circolazione Globale e Regionale. Queste informazioni rappresentano la base conoscitiva fondamentale per capire cosa succederà e quali azioni potremmo mettere in atto per mitigare i rischi e adattarci ai cambiamenti climatici. Infatti, la riduzione del rischio e l'aumento della resilienza degli ecosistemi e dei sistemi antropici agli impatti dei cambiamenti climatici sono obiettivi comuni su cui paesi come l'Italia e la Francia si sono impegnati attraverso l'adesione all'Accordo di Parigi e al Quadro di Riferimento di Sendai (UNISDR, 2015).

L'obiettivo di questo rapporto è pertanto fornire una base comune ai territori del programma Interreg relativa all'evoluzione del clima recente e a quali scenari di cambiamento climatico le regioni del programma andranno incontro, per poi delineare come questi cambiamenti potranno incidere potenzialmente sul regime degli incendi. Il rapporto fornisce quindi informazioni propedeutiche per l'attività prevista nell'ambito della componente T3 nella quale sarà possibile evidenziare alcune azioni di adattamento e priorità di intervento per il territorio di programma

société européenne aux perturbations dues aux incendies et de l'évolution de la population, du développement technologique et de la gestion des terres.

Les impacts du changement climatique sur les variations du régime des feux (en termes de danger, de risque, d'occurrence et de propagation) sont analysés et évalués par l'intégration d'outils de modélisation avec des projections futures dérivant des modèles de circulation mondiaux et régionaux. Ces informations représentent la base de connaissances fondamentale pour comprendre ce qui va se passer et quelles actions nous pourrions prendre pour atténuer les risques et nous adapter au changement climatique. En fait, la réduction du risque et l'augmentation de la résilience des écosystèmes et des systèmes anthropiques aux impacts du changement climatique sont des objectifs communs auxquels des pays comme l'Italie et la France se sont engagés en adhérant à l'Accord de Paris et au Cadre de référence de Sendai (UNISDR, 2015).

L'objectif de ce rapport est donc de fournir une base commune aux territoires du programme Interreg concernant l'évolution récente du climat et les scénarios de changement climatique auxquels les régions du programme seront confrontées, puis de décrire comment ces changements pourraient potentiellement affecter le régime des incendies. Le rapport fournit donc des informations préliminaires sur l'activité prévue au sein de la composante T3 dans laquelle il sera possible de mettre en évidence certaines actions d'adaptation et priorités d'intervention.

## Messages clés - Messaggi chiave

### Aumento delle temperature.

- **Sardegna, Liguria e Toscana** – Gli scenari di emissione evidenziano un incremento della temperatura media distribuita uniformemente su tutto il territorio, fino a 1.5°C nel periodo 2021-2050 (rispetto a 1981-2010) e con lo scenario più ottimista (RCP4.5) e fino a 4.5°C a fine secolo nello scenario più pessimista (RCP8.5).
- **Corsica e PACA** - Aumento della temperatura media estiva tra 0.5 e 2° C entro il 2021-2050 con lo scenario RCP4.5, fino ai 5-6°C a fine secolo con lo scenario RCP8.5

### Più giorni caldi e ondate di calore

- **Sardegna, Liguria e Toscana** – Il modello climatico considerato proietta un consistente aumento di giorni con temperatura massima maggiore di 29.2°C per entrambi gli scenari, più marcato per la fine del secolo.
- **Corsica e PACA** – i modelli climatici considerati sono discordanti per il medio periodo, mentre sembrano essere più vicini nel lungo periodo e sotto lo scenario di emissione RCP8.5, proiettando 6-10 giorni di siccità in più rispetto al periodo riferimento

### Decremento delle precipitazioni estive

- **Sardegna, Liguria e Toscana** – Diminuzione delle precipitazioni nel periodo estivo in tutto il territorio di programma, tranne per la Sardegna nel medio periodo sotto lo scenario più pessimista (RCP8.5)
- **Corsica e PACA** – Diminuzione delle precipitazioni nel periodo estivo compresa tra 0.25 e 1 mm / giorno per

### Hausse des températures.

- **Sardaigne, Ligurie et Toscane** - Les scénarios d'émission montrent une augmentation de la température moyenne uniformément répartie sur tout le territoire, jusqu'à 1.5 ° C sur la période 2021-2050 (par rapport à 1981-2010) et avec le scénario le plus optimiste (RCP4. 5) et jusqu'à 4.5 ° C à la fin du siècle dans le scénario le plus pessimiste (RCP8.5).
- **Corse et PACA** - Augmentation moyenne de la température estivale entre 0.5 et 2° C d'ici 2021-2050 avec le scénario RCP4.5, jusqu'à 5-6° C à la fin du siècle avec le scénario RCP8.5

### Plus de journées chaudes et de vagues de chaleur

- **Sardaigne, Ligurie et Toscane** - Le modèle climatique considéré projette une augmentation constante du nombre de jours avec une température maximale supérieure à 29.2 ° C pour les deux scénarios, plus marquée à la fin du siècle.
- **Corse et PACA** - les modèles climatiques considérés sont discordants à moyen terme, alors qu'ils semblent plus proches à long terme et dans le scénario d'émission RCP8.5, projetant 6-10 jours de sécheresse de plus que la période de référence

### Diminution des précipitations estivales

- **Sardaigne, Ligurie et Toscane** - Diminution des précipitations en période estivale dans toute la zone du programme, sauf pour la Sardaigne à moyen terme dans le scénario le plus pessimiste (RCP8.5)

fine secolo sotto lo scenario RCP8.5, meno marcati con lo scenario RCP4.5

### **Impatti sugli incendi boschivi**

Sono attesi incrementi della pericolosità di incendio sotto lo scenario RCP8.5 e sul lungo periodo (2079-2098), così come un aumento del numero di giorni per stagione degli incendi con pericolosità molto alta, specialmente per Sardegna (+28 giorni rispetto al periodo storico), seguita dalla regione PACA (+20) e dalla Toscana (+18). Tali incrementi si potranno tradurre in un aumento delle superfici percorse, che arrivano fino al 100%, considerando uno scenario di riscaldamento a 3°C.

- **Corse et PACA** - Diminution des précipitations en période estivale entre 0.25 et 1 mm / jour pour la fin du siècle dans le scénario RCP8.5, moins marquée avec le scénario RCP4.5

### **Impacts sur les incendies de forêt**

Des augmentations du risque d'incendie sont attendues dans le scénario RCP8.5 et à long terme (2079-2098), ainsi qu'une augmentation du nombre de jours par saison d'incendies à très haut risque, en particulier pour la Sardaigne (+28 jours par rapport à l'historique), suivie de la région PACA (+20) et de la Toscane (+18). Ces augmentations pourraient se traduire par une augmentation des surfaces parcourues, qui atteignent jusqu'à 100%, en considérant un scénario de chauffage à 3°C.

## Le climat récent

L'objectif de ce chapitre est de présenter la variabilité climatique observée au niveau local pour les territoires du programme Interreg Maritime Italie France, à savoir la Sardaigne, la Toscane, la Ligurie, la Corse et la PACA (Provence-Alpes-Côte d'Azur).

L'analyse a été réalisée à travers un criblage bibliographique visant à évaluer la disponibilité des informations et des données relatives aux indicateurs climatiques pertinents pour l'étude de l'occurrence et du comportement des incendies de forêt.

Le Tableau 1 rapporte les documents qui ont été collectés et analysés et les périodes utilisées pour l'analyse.

En ce qui concerne la Sardaigne, les résultats préliminaires de l'élaboration de la climatologie de la Sardaigne pour les trente années 1981-2010 ont été analysés en premier lieu. Le rapport décrit la collecte, le contrôle et l'intégration des séries de données historiques sur la température et les précipitations à partir de deux bases de données. L'analyse menée en 2019 a conduit à la production d'un premier jeu d'indicateurs climatiques. Dans un deuxième temps, les informations contenues dans la Stratégie Régionale d'Adaptation au Changement Climatique ont été collectées.

Le rapport publié en 2012 "Le changement climatique - un regard sur la Toscane", créé dans le but de collecter et de résumer les principales tendances climatiques en cours au cours des dernières décennies (1991-2008 par rapport à la période 1961-1990), a plutôt été utilisé pour la Région Toscane.

En ce qui concerne la région de la Ligurie, la source de données sélectionnée est représentée par l'Atlas climatique, un document qui vise à sélectionner, compléter et mettre à jour les séries historiques officielles de précipitations et de températures représentatives de la climatologie ligurienne et dériver de ces indications sur la tendance climatique pour la période 1961-2010 étudiée, ainsi que sur les trois trentenaires 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010, tant au niveau aréolaire que monosite.

Pour la partie française du territoire du programme, c'est-à-dire la région Corse et la région PACA (Provence-Alpes-Côte d'Azur), les informations ont été collectées sur le site [www.meteofrance.fr](http://www.meteofrance.fr).

Les indicateurs sélectionnés, certains spécifiquement utilisés pour l'analyse des événements dits « extrêmes », sont liés aux variables précipitations et température (Tableau 2 et Tableau 3), et sont analysés pour réaliser des études sectorielles visant également à évaluer les principaux impacts locaux du changement climatique.

Tableau 1 - Documents collectés pour l'élaboration de ce chapitre

Région	Documents collectés	Period
SARDAIGNE	2020. Elaborazione della climatologia della Sardegna per il trentennio 1981-2010 <a href="http://www.sar.sardegna.it/pubblicazioni/miscellanea/ReportClima1981-2010.pdf">http://www.sar.sardegna.it/pubblicazioni/miscellanea/ReportClima1981-2010.pdf</a> 2019. Strategia Regionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici <a href="https://delibere.regione.sardegna.it/protected/45525/0/def/ref/DBR45368/">https://delibere.regione.sardegna.it/protected/45525/0/def/ref/DBR45368/</a>	1981-2010
TOSCANE	2012. Clima che cambia – Uno sguardo sulla Toscana <a href="https://www.researchgate.net/publication/264539774_Clima_che_cambia_-_Uno_sguardo_sulla_Toascana">https://www.researchgate.net/publication/264539774_Clima_che_cambia_-_Uno_sguardo_sulla_Toascana</a> 2010 Programma di Azione Locale di lotta alla siccità e alla desertificazione. <a href="https://www.minambiente.it/sites/default/files/archivio/allegati/desertificazione/Relazione_finale_PAL_Toscana_x2x.pdf">https://www.minambiente.it/sites/default/files/archivio/allegati/desertificazione/Relazione_finale_PAL_Toscana_x2x.pdf</a>	1991-2008 vs. 1961-1990
LIGURIE	Atlante Climatico della Liguria	1961-2010 e 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010
CORSE	<a href="http://www.meteofrance.fr">www.meteofrance.fr</a>	1959-2018 vs. 1961-1990
PACA	<a href="http://www.meteofrance.fr">www.meteofrance.fr</a>	1959-2018 vs. 1961-1990

Tableau 2 - Indicateurs considérés

INDICATEUR	DESCRIPTION
TG	Température moyenne quotidienne (°C)
TX	Température maximale quotidienne (°C)
TN	Température minimale quotidienne (°C)
PRCPTOT	Précipitations annuelles cumulées (mm)
PRCPTOT JJA	Précipitations cumulées (mm) sur les mois de juin, juillet et août
CDD	Jours secs consécutifs. Nombre annuel maximum de jours consécutifs avec précipitation <1 mm
SU95P	Jours d'été. Nombre de jours par an avec TX > 29,2°C
HW	Vagues de chaleur. Nombre de jours par an avec TX > 35°C
DRY SPELLS	Nombre annuel de jours avec précipitation <1 mm

Tableau 3 - Synthèse des indicateurs disponibles pour le domaine du programme

INDICATEURS REGION	TG	TX	TN	SU	HW	PRCPTOT	PRCPTOT JJA	CDD
SARDAIGNE	X	X	X	X		X	X	X
TOSCANE	X	X	X	X		X		
LIGURIE	X	X	X			X	X	X
CORSE	X	X	X	X	X	X	X	
PACA	X	X	X	X	X	X	X	

## Sardegna

Les indicateurs relatifs aux variables de température et de précipitations ont été trouvés grâce au document "Elaboration de la climatologie de la Sardaigne pour les trente années 1981-2010". Les travaux, réalisés par le Département Météoclimatique de l'ARPAS et le Secteur de la Climatologie Opérationnelle de l'ISPRA, concernaient la mise à jour de la climatologie de la Sardaigne pour les trente années 1981-2010, à travers l'exécution d'une série de procédures de contrôle et d'élaboration de la série de données historiques de température et de précipitations. La première étape consistait en un contrôle qualité approfondi et une analyse précise de l'homogénéité de la série dans le but de maximiser le nombre de stations disponibles ; la deuxième étape impliquait le calcul des valeurs climatologiques mensuelles et annuelles pour les températures et les précipitations, conformément aux directives établies par l'Organisation météorologique mondiale (OMM).

En termes de température (Figure 1), on observe une température minimale moyenne qui, sur la période 1981-2010, varie entre 6,7°C et 14,8°C au cours de l'année et une température maximale moyenne qui varie entre 16,8°C et 23,8°C. C En termes de précipitations, en revanche, on observe une précipitation moyenne annuelle qui varie entre 400 mm et 1200 mm (Figure 2). Quatre zones pluvieuses sont évidentes : les zones proches du Gennargentu (Barbagie, Ogliastra et zones voisines), la partie centrale de la Gallura (près du Limbara), le plateau de Campeda et la bande centrale du nord de la Sardaigne (autour du bassin des Coghinas). Nurra, Campidano et Iglesiente sont présentées comme des zones sèches.

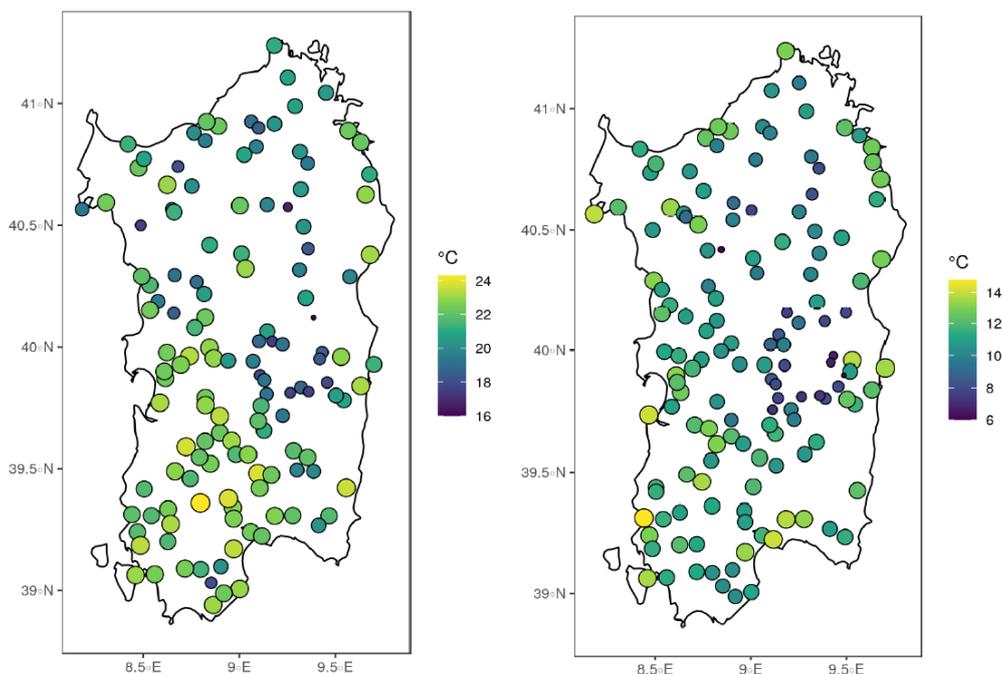


Figure 1 - Valeurs climatologiques annuelles des températures minimales (TN, à gauche) et maximales (TX, à droite) pour les trente années 1981-2010. Source: [http://www.sardegnaambiente.it/documenti/21\\_393\\_20200204130013.pdf](http://www.sardegnaambiente.it/documenti/21_393_20200204130013.pdf)

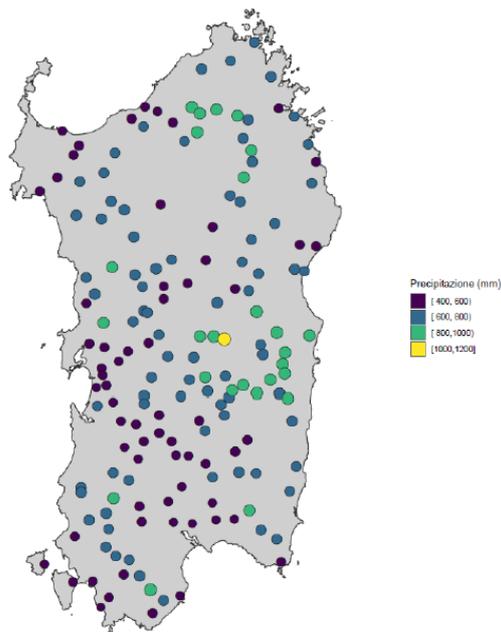


Figure 2 - Cumuls climatologiques annuels des précipitations pour les trente années 1981-2010.  
 Source : [http://www.sardegnaambiente.it/documenti/21\\_393\\_20200204130013.pdf](http://www.sardegnaambiente.it/documenti/21_393_20200204130013.pdf)

température maximale journalière supérieure à 30,1°C (SU95p) qui varie entre 5 et 55, avec des pointes d'environ 55 jours/an dans le sud. En termes de précipitations, la région Sardaigne se caractérise par un nombre maximal de jours annuels consécutifs sans précipitations (CDD) qui varie d'environ 60 à 80, en accord général avec ce qui est rapporté par les données régionales » (SRACC, 2018).

En ce qui concerne les indicateurs extrêmes sélectionnés (Tableau 1), ceux-ci ont été trouvés dans la Stratégie régionale d'adaptation au changement climatique, qui rapporte les données mises à disposition par le Service hydrographique régional et une analyse réalisée avec le jeu de données d'observation E-OBS sur le climat période de référence 1981-2010 par la Fondation CMCC.

Selon le premier ensemble de données, la Sardaigne se caractérise par un nombre moyen maximum de jours consécutifs avec des précipitations inférieures à 1 millimètre qui varie entre 47 et 100 (valeurs les plus élevées dans la zone sud de la Sardaigne ; en particulier, les pics concernent la zone côtière Sud-Ouest).

Passant au deuxième jeu de données, on observe que la température moyenne annuelle (Tmean) « varie entre 13°C et 17°C, avec des pics de 17°C présents principalement dans le sud et sur la côte nord-est de la Sardaigne. De plus, la région Sardaigne se caractérise par un nombre moyen de jours par an avec une

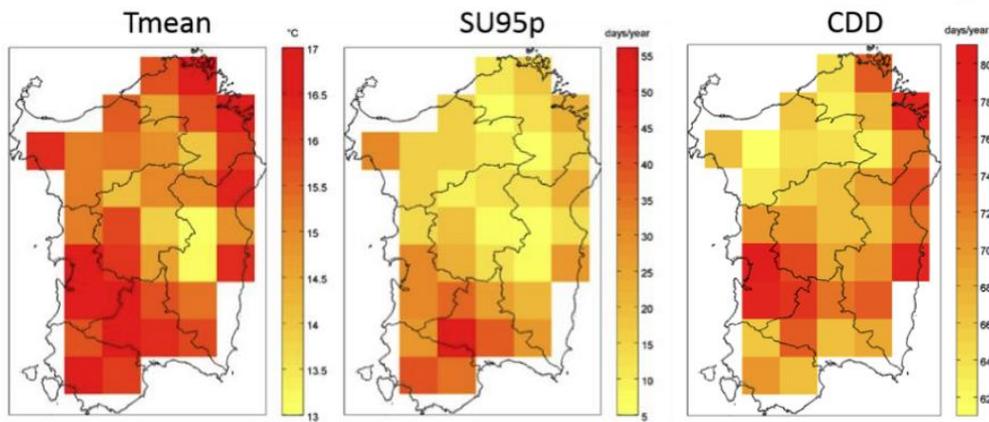


Figure 3 - Cartographie des indicateurs de température Tmean, SU95p et CDD (E-OBS, 1981-2010). Source : <https://delibere.regione.sardegna.it/protected/45525/0/def/ref/DBR45368/>

## Toscane

Les indicateurs relatifs aux variables de température et de précipitations ont été trouvés sur le site du LAMMA et grâce au document "Changement climatique - Un regard sur la Toscane", publié en 2012.

Le tableau 4 montre les plages de valeurs annuelles moyennes de température (moyenne, minimale et maximale) et de précipitations sur toute la période d'observation 1981-2010 pour les stations représentatives des cinq provinces côtières de la région de Toscane qui relèvent de la zone du programme. Au niveau de la température, il existe une température minimale moyenne qui varie entre 9,4°C et 12,7°C au cours de l'année et une température maximale moyenne qui varie entre 19,5°C et 21,0°C. En termes de précipitations, en revanche, on observe une précipitation annuelle moyenne qui varie entre 560 mm à Grosseto et 1172 mm à Lucca.

Tableau 4 - Températures moyennes (TG), minimales (TN) et maximales (TX) et précipitations totales (PRCPTOT) pour la période 1981-2010 pour les stations représentatives de la Toscane. Source : <http://www.lamma.rete.toscana.it/clima-e-energia/climatologia>

Provincia	TG	TX	TN	PRCPTOT
<b>Grosseto</b>	14,7	21,0	9,4	650
<b>Livorno</b>	16,1	19,5	12,7	804
<b>Lucca</b>	15,2	20,4	10,0	1172
<b>Massa</b>	16,0	20,6	11,4	1151
<b>Pisa</b>	15,3	20,0	9,6	866

Une étude du LaMMA (2010) a comparé les données spatialisées sur le territoire régional de la température moyenne annuelle des 18 dernières années, à savoir la période 1991-2008, avec les cartes des trente années de référence climatologique '61-90s. Cette analyse montre une augmentation moyenne de la température annuelle de +0,5°C. L'anomalie de température, constatée sur l'ensemble du territoire toscan, est plus importante avec des

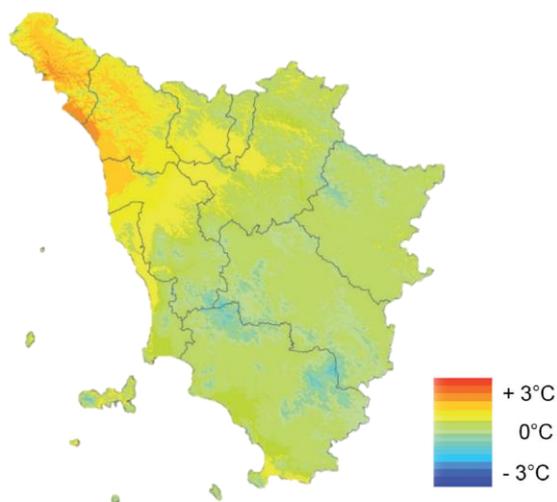


Figure 4 - Carte des variations annuelles moyennes de température (°C) de la période 1991-2008, par rapport aux trente années de référence 1961-1990. Source : LaMMA, 2010

augmentations supérieures à la moyenne dans les zones de la Garfagnana et de la Lunigiana (provinces de Massa et Lucca) (Figure 4). L'augmentation annuelle moyenne de la température était de 0,5°C. Considérant les saisons individuelles, les données révèlent que la tendance à la hausse des températures est évidente au printemps (+ 0,6°C), en été (+ 0,9°C) et, dans une moindre mesure, en hiver (+ 0,3°C), principalement en raison du réchauffement accru dans la partie nord-ouest de la région. En automne, cependant, il n'y a pas de variations significatives.

différences entre la période 1991-2008 par rapport à la période de référence de '61 -'90, se trouvent dans la Garfagnana.

En ce qui concerne les précipitations, cependant, les données montrent une tendance négative généralisée (Figure 5), avec des valeurs moyennes régionales de -12%. Au niveau annuel, les plus grandes

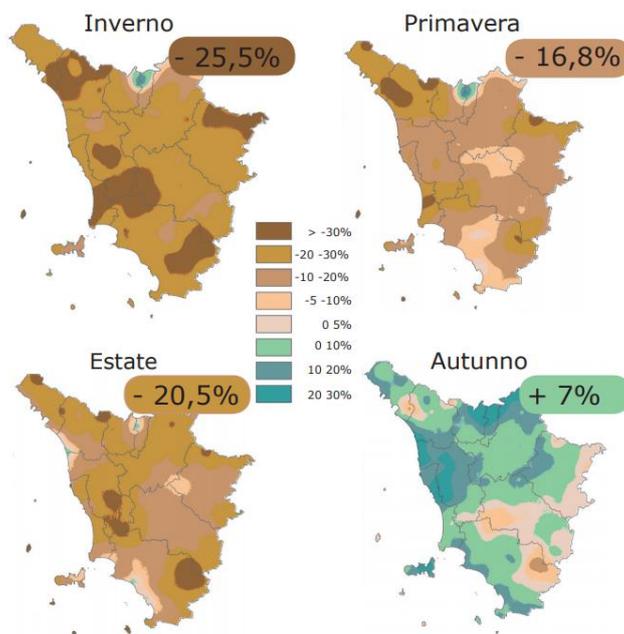


Figure 5 - Cartes des anomalies saisonnières des précipitations (mm) de la période 1991-2008 par rapport à la référence trentenaire 1961-1990. Source: LaMMA, 2010

## Liguria

Les travaux rapportés dans le document "Atlas climatique de la Ligurie" ont été réalisés par l'ARPAL, au Centre fonctionnel météorologique et hydrologique de la protection civile, dans le cadre du projet Res-Mar. Les valeurs de température et de précipitations ont été analysées sur l'ensemble de la série historique 1961-2010, ainsi que sur les trois trentennaires 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 et sur la période de vingt ans 1991-2010.

En ce qui concerne les températures (Figure 6), on observe que l'ouest est plus doux que l'est tant au niveau des champs moyens qu'au niveau des champs extrêmes. En comparant les trente années 1981-2010 avec 1961-1990, il a été possible de trouver des augmentations prédominantes des températures à la fois dans les gammes moyennes et dans les gammes extrêmes. Cependant, il convient de garder à l'esprit que le nombre de stations disponibles pour l'analyse est limité.

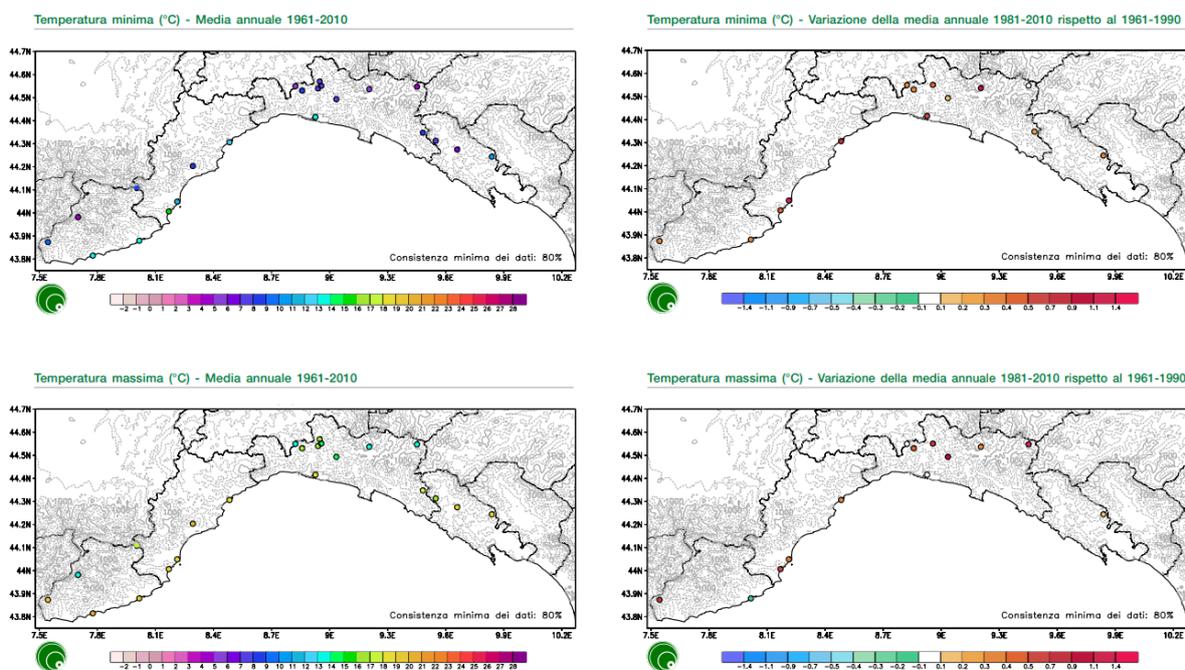


Figure 6 - Moyenne annuelle des températures minimales et maximales pour la période 1961-2010 (à gauche) et anomalies moyennes annuelles des températures minimales et maximales pour la période 1981-2010 par rapport à 1961-1990 (à droite).

[https://www.arpal.liguria.it/contenuti\\_statici/clima/atlante/Atlante\\_climatico\\_della\\_Liguria.pdf](https://www.arpal.liguria.it/contenuti_statici/clima/atlante/Atlante_climatico_della_Liguria.pdf)

En analysant les champs de précipitations, l'est de la région est beaucoup plus humide que l'ouest (Figure 7). Cette caractéristique se manifeste non seulement en termes de précipitations cumulées, mais également en termes de nombre réduit de jours secs consécutifs. En comparant les trente années 1981-2010 avec 1961-1990 on observe une diminution généralisée des cumuls pluviométriques moyens annuels ainsi que des cumuls estivaux (Figure 8).

L'étude se poursuit par la présentation de graphiques et de tableaux au niveau des points pour les stations thermométriques et pluviométriques individuelles (exemple de la figure 9), et l'étude des tendances des données de température et de précipitations avec l'estimation de l'importance de la différence entre les valeurs moyennes et saisonnières relatives aux vingt dernières années par rapport aux trente premières années.

L'augmentation des températures minimales et maximales est significativement positive surtout en ce qui concerne les périodes de printemps et d'été. En particulier, les températures minimales augmentent significativement dans 70% des cas annuellement, dans 48% des cas au printemps. Les températures maximales quant à elles augmentent significativement dans 55% des cas annuellement, dans 67% des cas au printemps et dans 64% des cas en été.

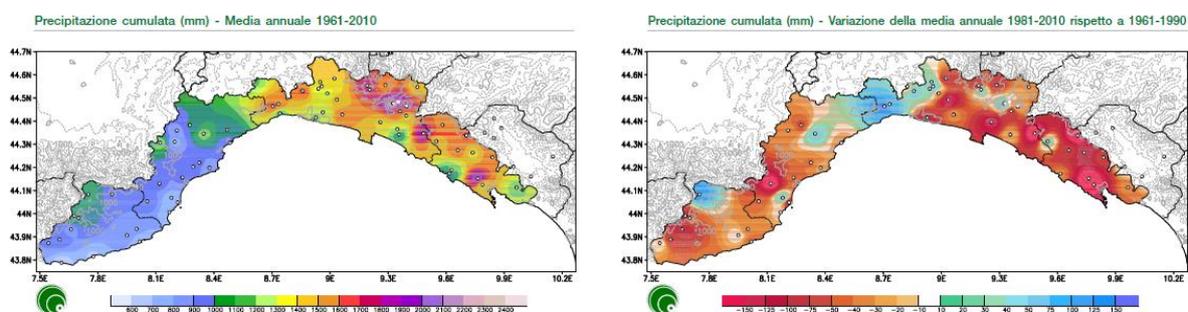


Figure 7 - Précipitations annuelles moyennes cumulées pour la période 1961-2010 (à gauche) et anomalies annuelles moyennes des précipitations cumulées pour la période 1981-2010 par rapport à 1961-1990 (à droite).  
 Source : [https://www.arpal.liguria.it/contenuti\\_statici/clima/atlante/Atlante\\_climatico\\_della\\_Liguria.pdf](https://www.arpal.liguria.it/contenuti_statici/clima/atlante/Atlante_climatico_della_Liguria.pdf)

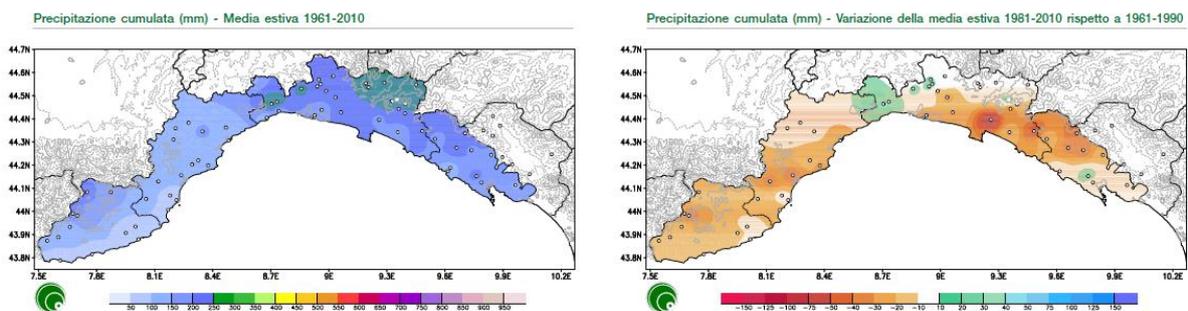


Figure 8 - Moyenne estivale des cumuls pluviométriques pour la période 1961-2010 (gauche) et moyennes estivales des anomalies cumulées pluviométriques pour la période 1981-2010 par rapport à 1961-1990 (droite).  
 Source : [https://www.arpal.liguria.it/contenuti\\_statici/clima/atlante/Atlante\\_climatico\\_della\\_Liguria.pdf](https://www.arpal.liguria.it/contenuti_statici/clima/atlante/Atlante_climatico_della_Liguria.pdf)



Temperature annuali

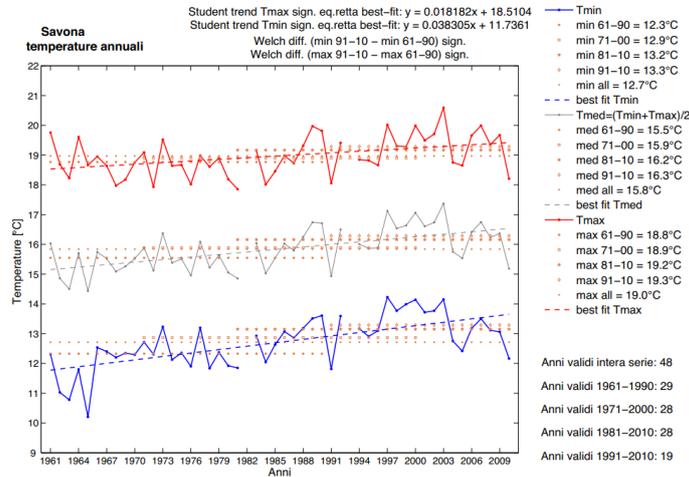


Figure 9 - Tendence des données de température minimale, moyenne et maximale pour la période 1961-2010 pour la station de Savone. Source: [https://www.arpal.liguria.it/contenuti\\_statici/clima/atlante/Atlante\\_climatico\\_della\\_Liguria.pdf](https://www.arpal.liguria.it/contenuti_statici/clima/atlante/Atlante_climatico_della_Liguria.pdf)

## Corse

En 2014, Météo-France a publié une nouvelle série de données mensuelles homogènes de température qui permet de couvrir l'ensemble du territoire national, permettant ainsi une estimation robuste de l'évolution de la température des années 1950 à la fin des années 2000 (Gibelin et al., 2014). Le traitement statistique appliqué par Météo-France aux séries temporelles consiste à détecter et rectifier des ruptures dans les données brutes afin de produire séries de référence adaptées à la quantification du changement climatique. Sur tout le territoire en France il y a donc 228 séries de températures minimales mensuelles et 251 séries de température maximales homogène. Pour chaque région administrative, un maximum de 4 séries homogènes a été sélectionnées, en fonction de la qualité et de la représentativité des données.

Dans les graphiques suivants, les séries homogènes couvrent donc la période 1959-2009 mais sont étendues à la date la plus récente représentée par une couleur plus claire. Une bande grise est mise en évidence si la série commence après 1959, la ligne brune continue représente la moyenne mobile sur 11 ans.

L'évolution des températures moyennes annuelles en Corse montre un net réchauffement depuis 1959. Sur la période 1959-2009, la tendance observée des températures moyennes est de + 0,2°C par décennie. Les trois années les plus chaudes de la Corse depuis 1959, 2015, 2016 et 2018, ont été observées au XXI<sup>e</sup> siècle (Figure 10). La tendance observée des températures moyennes saisonnières pour la station de Bastia et la station d'Ajaccio montre une augmentation d'environ + 0,2°C pour décennie pour le printemps et l'automne, + 0,3°C par décennie pour l'été et + 0,1°C par décennie pour l'hiver (données non présentées). Au cours des vingt premières années du XXI<sup>e</sup> siècle, les deux hivers les plus doux, 2006/2007 et

2015/2016, et les trois étés les plus chauds, 2003, 2015 et 2017, ont été enregistrés depuis 1959, ainsi que les deux automnes les plus chauds, 2014 et 2018.

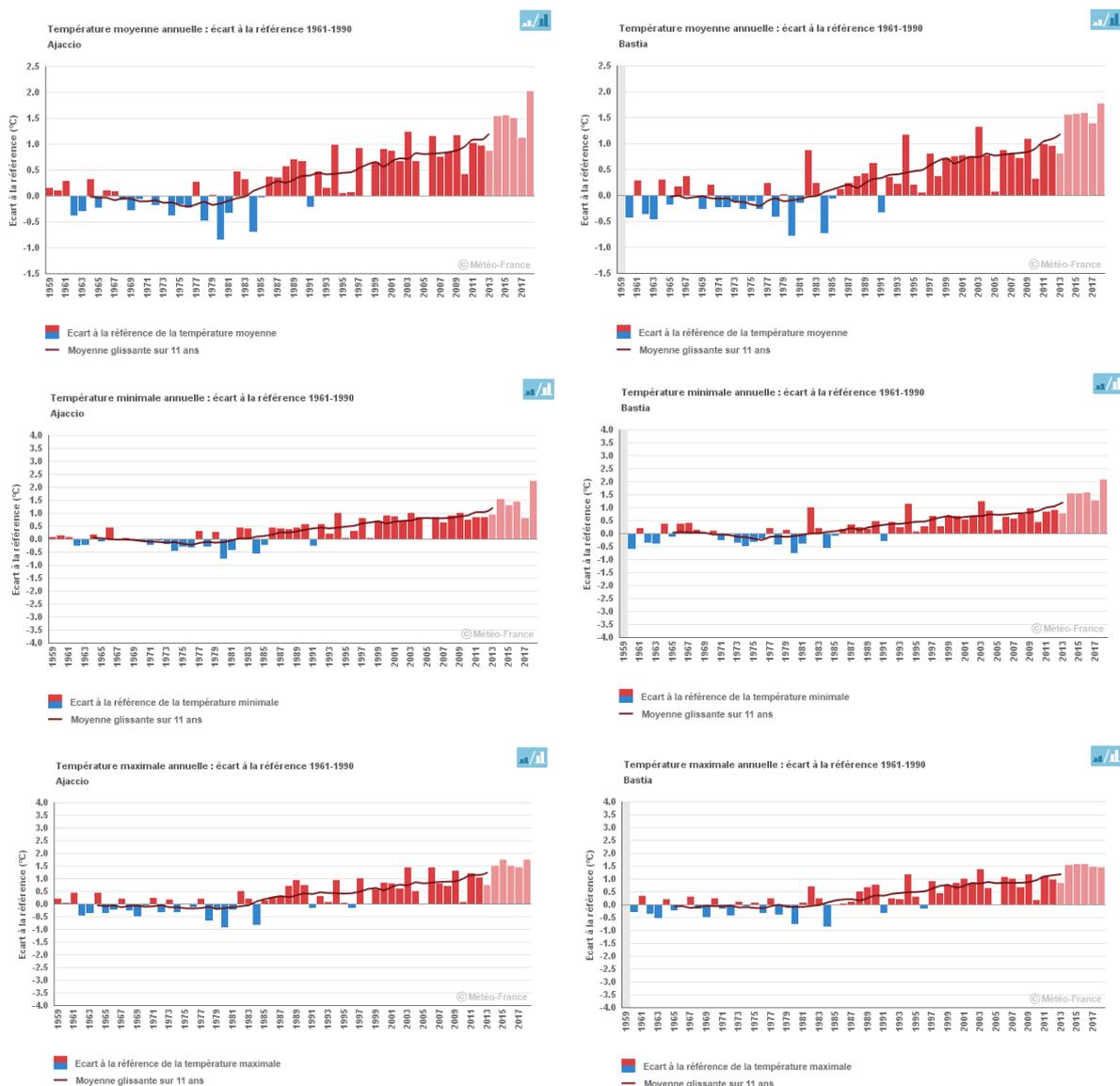


Figure 10 - Anomalies des températures annuelles moyennes, minimales et maximales pour la période 1959-2018 par rapport à la période 1961-1990 enregistrées dans les stations d'Ajaccio (à gauche) et de Bastia (à droite). La ligne brune représente la moyenne mobile sur 11 ans. Source: MétéoFrance

Les précipitations annuelles ont légèrement diminué depuis 1959. Cependant, la période ne montre pas de tendance claire mais se caractérise par une grande variabilité d'une année à l'autre (Figure 11). Enfin, le nombre annuel de jours chauds (températures maximales supérieures à 25°C) varie considérablement d'année en année, mais aussi en fonction de la situation géographique. Sur la période 1959-2009, une augmentation du nombre de jours chauds est observée, allant de 5 à 6 jours par décennie (Figure 13). 2009, 2011, 2014 et 2015

figurent parmi les premières places parmi les années qui ont connu le plus grand nombre de journées chaudes.

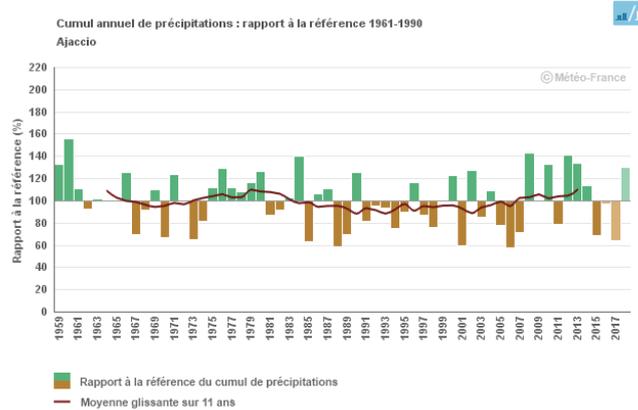


Figure 11 - Anomalies des précipitations annuelles pour la période 1959-2018 par rapport à 1961-1990, Ajaccio. La ligne brune représente la moyenne mobile sur 11 ans. Source: MétéoFrance

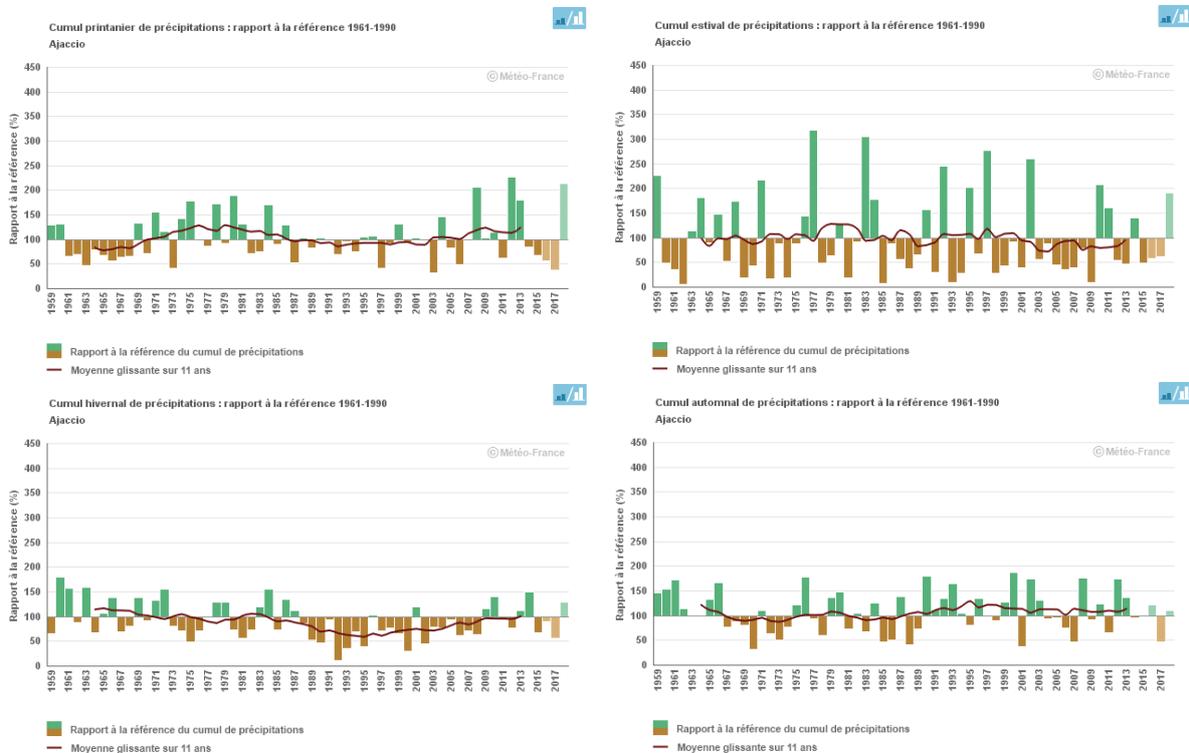


Figure 12 - Anomalies des précipitations saisonnières pour la période 1959-2018 par rapport à 1961-1990, Ajaccio. La ligne brune représente la moyenne mobile sur 11 ans. Source: MétéoFrance

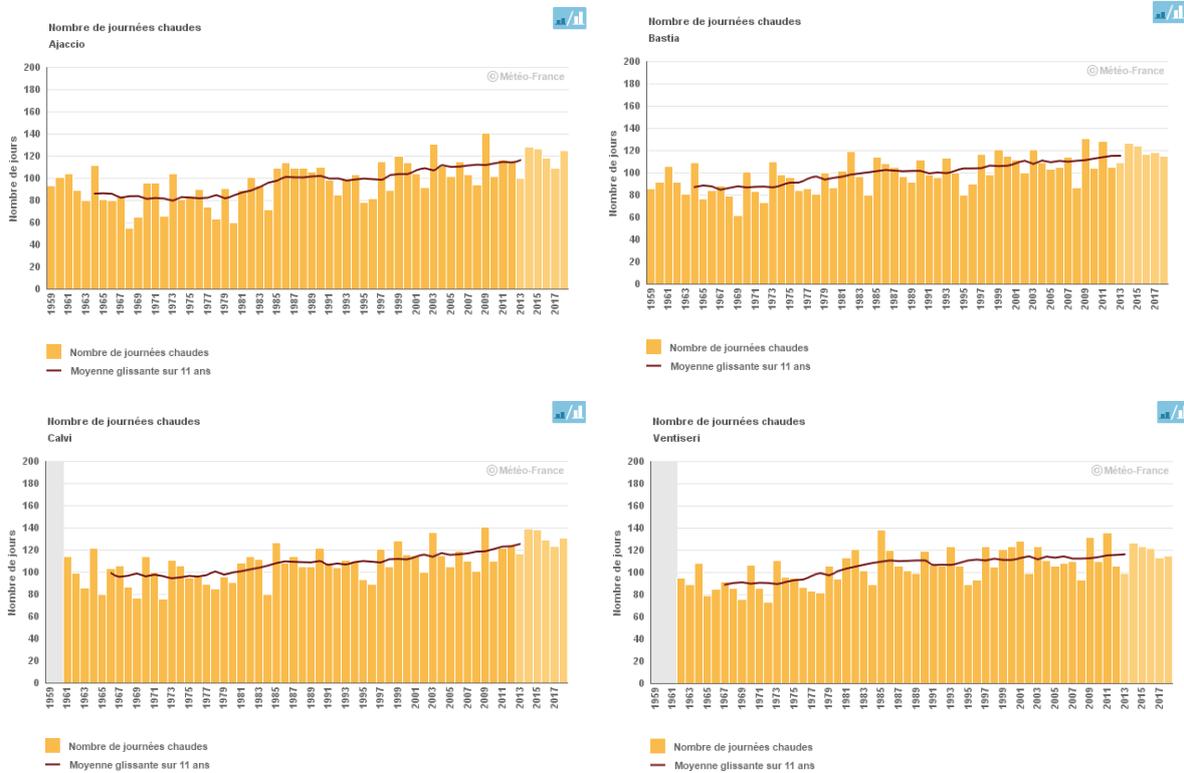


Figure 13 - Nombre de jours chauds pour la période 1959-2018 pour les stations d'Ajaccio, Bastia, Calvi et Ventiseri. La ligne brune représente la moyenne mobile sur 11 ans. Source: MétéoFrance

Les canicules enregistrées depuis 1947 en Corse ont été pratiquement toutes observées au cours des dernières décennies, un seul événement a été identifié avant 1983. La canicule observée du 2 au 25 août 2003 est de loin la plus longue et la plus grave qui ait eu lieu dans la région. Mais la journée la plus chaude depuis 1947 a été observée lors de la canicule survenue entre le 30 juillet et le 9 août 2017 (Figure 14).

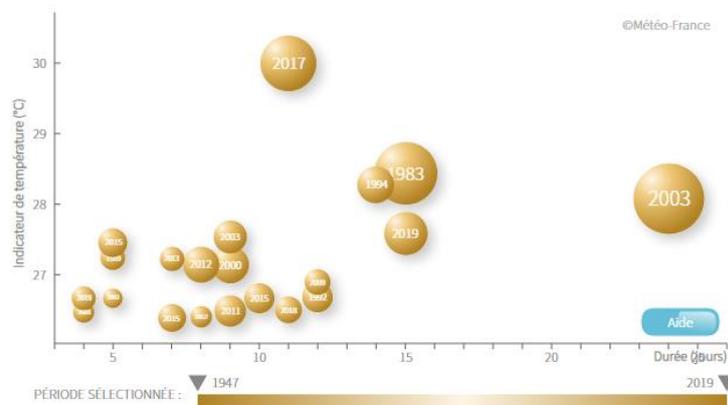


Figure 14 - Vagues de chaleur pour la période 1947-2019 en Corse. Source: MétéoFrance

## PACA

Le jeu de données utilisé pour décrire le climat récent de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur est le même qu'en Corse. En région PACA, l'évolution des températures moyennes annuelles montre un fort réchauffement depuis 1959. Sur la période 1959-2009, la tendance observée des températures moyennes annuelles est de + 0,3°C par décennie. La tendance observée pour les températures minimales annuelles et les températures maximales annuelles est comprise, respectivement, entre +0,2°C et +0,3°C et +0,3°C et +0,4°C par décennie. Comme pour la Corse, les deux années les plus chaudes en termes de températures moyennes depuis 1959 en Provence-Alpes-Côte d'Azur ont été observées au 21<sup>ème</sup> siècle, 2015 et 2018. Les températures maximales, les quatre années les plus chaudes depuis 1959, ont été observées en 2011, 2015, 2017 et 2018.

L'évolution des températures moyennes en hiver en Provence-Alpes-Côte d'Azur montre un réchauffement depuis 1959. Sur la période 1959-2009, la tendance observée des températures moyennes hivernales est proche de + 0,2°C par décennie, similaire à celle observée en automne. Dans la même période, la tendance observée dans les températures moyennes printanières est de + 0,3°C alors que pour les températures moyennes estivales la fourchette se situe entre + 0,4°C et + 0,5°C par décennie (données non présentées). Les trois hivers les plus doux depuis 1959 ont été observés en 1989/1990, 2006/2007 et 2015/2016 tandis que le plus froid a été observé en 1962/63. En revanche, les quatre étés les plus chauds ont été enregistrés en 2003, 2015, 2017 et 2018.

En ce qui concerne les précipitations, les précipitations annuelles ont montré une diminution des cumuls depuis 1959 et se caractérise également par une grande variabilité d'une année à l'autre (Figure 16). La baisse enregistrée au niveau annuel est également évidente en période estivale, alors que la tendance printanière est moins marquée et que la tendance automnale ne montre pas de changements significatifs. Le site MétéoFrance met en évidence non seulement la grande variabilité annuelle mais aussi les disparités régionales; en particulier, les précipitations d'automne et de printemps sont en effet plus marquées dans l'est de la région. Le nombre annuel de jours chauds est assez variable d'une année à l'autre et d'une zone à l'autre de la région PACA (Figure 17). En effet, les journées chaudes sont plus fréquentes lorsque l'on s'éloigne des zones montagneuses et de la mer. Dans la période 1959-2009, une augmentation du nombre de jours chauds de 6 à 7 par décennie a été observée. Les années 2003, 2009, 2011 et 2018 ont été les années qui ont connu le plus grand nombre de jours chauds.

Les vagues de chaleur enregistrées depuis 1947 ont été significativement plus nombreuses ces dernières décennies, et cette évolution s'est également accompagnée d'un allongement de la durée des événements (Figure 18). Les huit vagues de chaleur les plus longues se sont produites après 1983. La plus grave vague de chaleur a eu lieu en 2003, du 2 au 24 août. La journée la plus chaude depuis 1947 a été enregistrée lors de l'épisode qui s'est produit du 25 juin au 8 juillet 2019.



# Interreg



UNIONE EUROPEA  
UNIONE EUROPEA

## MARITTIMO-IT FR-MARITTIME

Fonds européen de développement régional  
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



# MED-Star

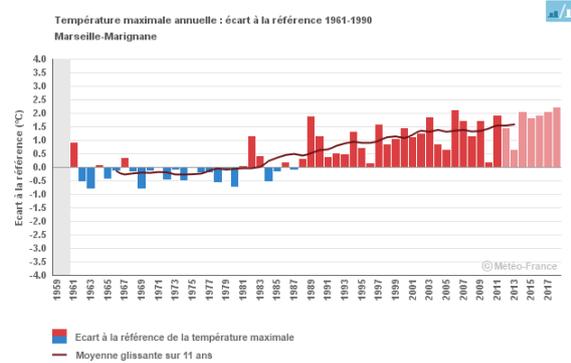
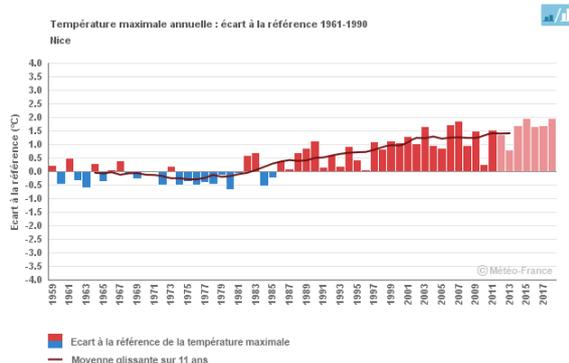
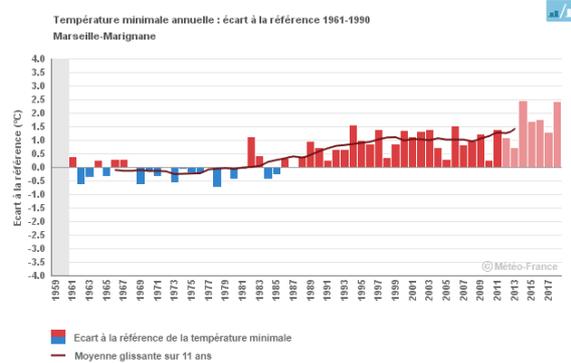
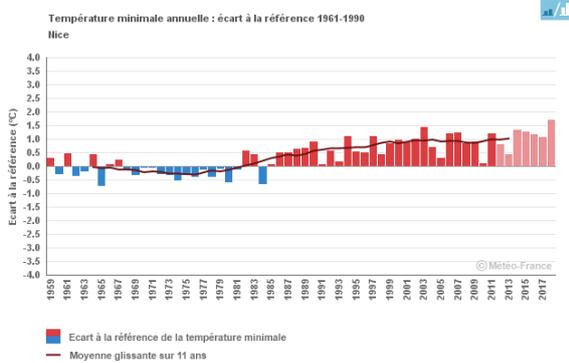
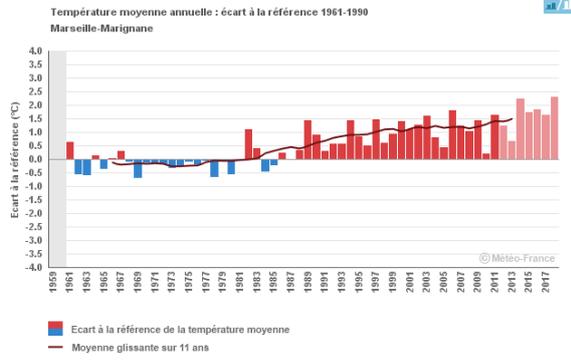
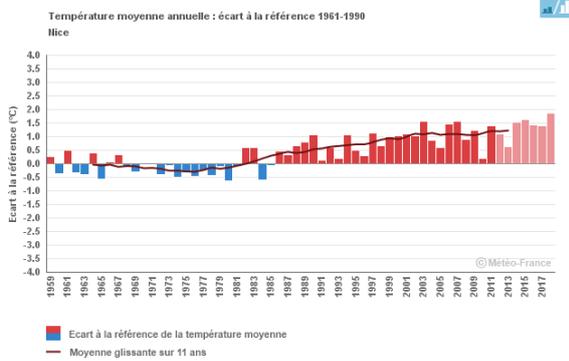


Figure 15 - Anomalies des températures annuelles moyennes, minimales et maximales pour la période 1959-2018 par rapport à la période 1961-1990 enregistrées dans les stations de Nice (gauche) et Marseille-Margiane (droite). La ligne brune représente la moyenne mobile sur 11 ans. Source: MétéoFrance

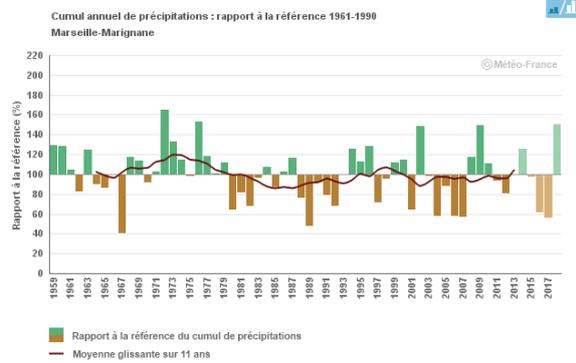
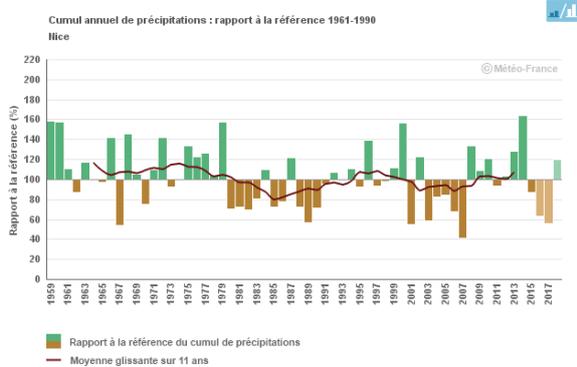


Figure 16 - Anomalies des précipitations annuelles pour la période 1959-2018 par rapport à 1961-1990, Nice (gauche) et Marseille (droite). La ligne brune représente la moyenne mobile sur 11 ans. Source: MétéoFrance

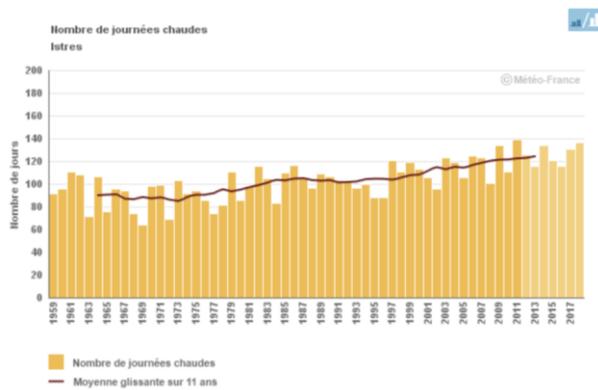
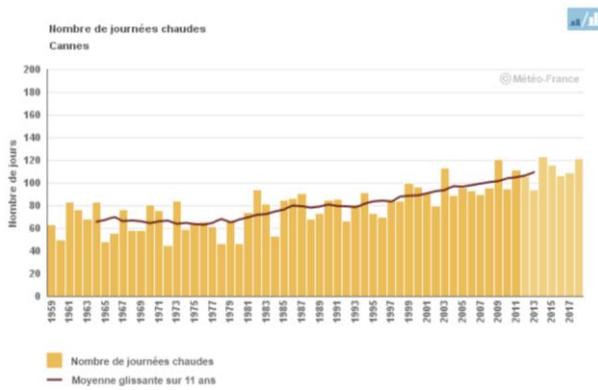


Figure 17 - Nombre de jours chauds pour la période 1959-2018 pour les stations de Cannes et Istres. La ligne brune représente la moyenne mobile sur 11 ans. Source: MétéoFrance

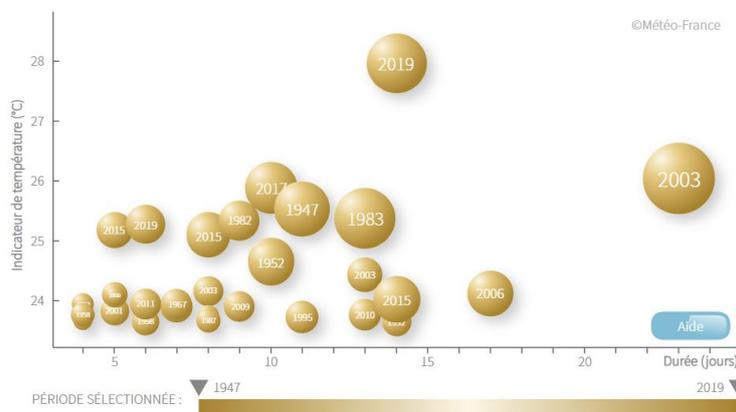


Figure 18 - Vagues de chaleur pour la période 1959-2018 en région PACA. Source: MétéoFrance

## Les changement climatique attendu

Les changements climatiques attendus sont “généralement évalués comme la différence, pour la variable ou l'indice d'intérêt, entre la tendance simulée pour la période d'intérêt future (appréciée sur la base de projections climatiques) et la tendance simulée sur une période de référence, ou sur une période actuelle ou dans un passé récent” (Spano et al., 2020).

La description du climat futur attendu dans une zone géographique donnée (projections climatiques) est obtenue grâce à l'utilisation de modèles climatiques. Ces modèles sont basés sur l'hypothèse que l'évolution dans l'atmosphère des concentrations de gaz changeant le climat affecte les conditions climatiques futures. À leur tour, les concentrations de gaz à effet de serre dépendent de la mise en œuvre ou non de politiques d'atténuation de ces gaz.

Dans le contexte du cinquième rapport d'évaluation sur le changement climatique (AR5) publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), les simulations climatiques à haute résolution se réfèrent à quatre scénarios de concentration différents de gaz à effet de serre, d'aérosols et de gaz chimiquement actifs (Moss et al., 2010), qui sont appelés RCP ou *Representative Concentration Pathways*.

Chaque RCP est associé à un nombre qui fait référence au Forçage Radiatif (RF) exprimé en unités de Watts par mètre carré ( $W/m^2$ ) et indique l'ampleur du changement climatique anthropique d'ici 2100 par rapport à la période préindustrielle. Le terme *Representative* indique que chaque RCP ne fournit qu'un seul des nombreux scénarios possibles qui conduiraient aux caractéristiques spécifiques de forçage radiatif. Le terme *Pathways* (chemin) met plutôt l'accent sur le fait que non seulement les niveaux de concentration à long terme sont intéressants, mais aussi la trajectoire suivie dans le temps pour atteindre ce résultat (Moss et al., 2010).

En particulier, les quatre RCP produits par des modèles d'évaluation intégrés et utilisés dans le RE5 comme base pour les prévisions et projections climatiques sont:

- RCP2.6: une trajectoire dans laquelle le forçage radiatif atteint son maximum à environ  $3 W m^{-2}$  avant 2100. Les émissions sont divisées par deux d'ici 2050. Le scénario suppose en effet des stratégies d'atténuation agressives; il est peu probable que l'augmentation de  $2^{\circ}C$  de la température moyenne mondiale par rapport aux niveaux préindustriels soit dépassée.
- RCP4.5 et RCP6.0: deux voies intermédiaires de stabilisation dans lesquelles le forçage radiatif est stabilisé à environ  $4,5 W m^{-2}$  et  $6,0 W m^{-2}$  après 2100;
- RCP8.5: une trajectoire pour laquelle les émissions devraient croître aux taux actuels et un forçage radiatif qui atteint plus de  $8,5 W m^{-2}$  d'ici 2100. Ce scénario suppose, d'ici 2100, des concentrations atmosphériques de  $CO_2$  triplées ou quadruples (840- 1120 ppm) par rapport aux niveaux préindustriels (280 ppm).

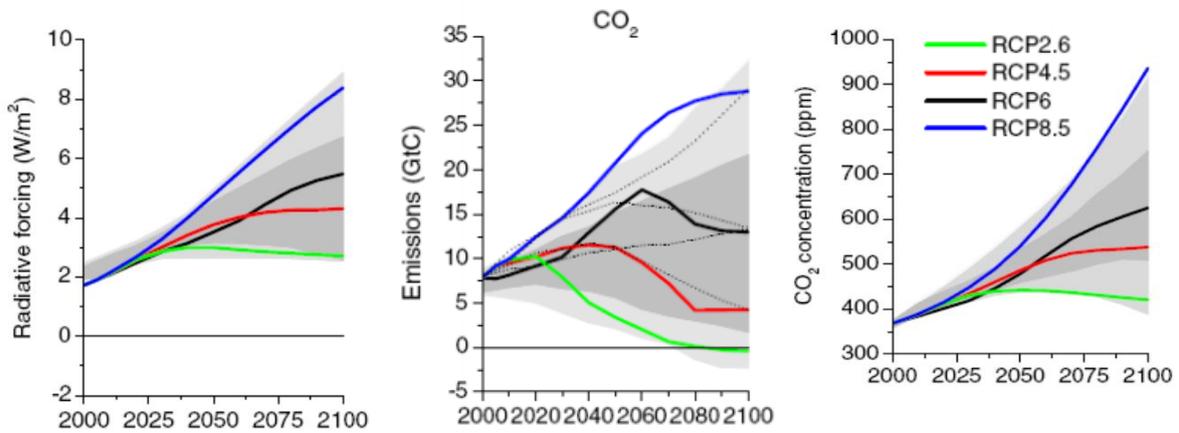


Figure 19 - Tendence du forçage radiatif (gauche), émissions de CO<sub>2</sub> pour les quatre RCP (centre), tendance de la concentration de CO<sub>2</sub> (droite). La zone grise indique les 98e et 90e centiles (respectivement gris clair et gris foncé (modifié par van Vuren, 2011))

Tableau 5 - Forçage radiatif, CO<sub>2</sub> émis (en ppm) et anomalie de température des 4 scénarios RCP et comparaison avec les scénarios SRES basés sur l'anomalie de température (Moss et al. 2010)

Nom	Forçage radiatif	CO <sub>2</sub> eq. (ppm)	Anomalie T (°C)	Chemin	SRES
<b>RCP2.6</b>	3 W m <sup>-2</sup> before 2100, declining to 2.6 W m <sup>-2</sup> by 2100	490	1.5	Peak and decline	Nessuno
<b>RCP4.5</b>	4.5 W m <sup>-2</sup> post 2100	650	2.4	Stabilization without overshoot	SRES B1
<b>RCP6.0</b>	6 W m <sup>-2</sup> post 2100	850	3.0	Stabilization without overshoot	SRES B2
<b>RCP8.5</b>	8.5 W m <sup>-2</sup> in 2100	1370	4.9	Rising	SRES A1F1

À l'échelle mondiale, les modèles de circulation générale (*global circulation models*, GCM) sont capables de simuler la réponse du système climatique mondial aux forçages externes avec une résolution d'environ 100 à 50 km. Les Modèles Climatiques Régionaux (*regional circulation models*, RCM) permettent donc de décrire la variabilité du climat de manière beaucoup plus détaillée, adaptée aux besoins des utilisateurs finaux qui ont besoin, à l'échelle régionale ou locale, d'une évaluation minutieuse à la fois des caractéristiques du climat, et les impacts (Spano et al., 2020).

Cette section illustre les projections climatiques des principaux indicateurs pour la zone du programme, qui sont référant à différents scénarios du GIEC et simulées à travers les différents modèles régionaux (Tableau 6). En effet, pour la Sardaigne, la Toscane et la Ligurie, les résultats relatifs au modèle régional COSMO-CLM sont présentés et discutés dans la configuration développée par le CMCC à une résolution d'environ 8 km forcée par le modèle global CMCC-CM (résolution horizontale 80 km) disponible sur le site

<https://www.cmcc.it/it/scenari-climatici-per-litalia>. Pour la Corse et la région PACA, les résultats de deux modèles régionaux, Aladin-Climat et WRF, sont présentés ainsi qu'un ensemble de données issues de certains des modèles disponibles dans le cadre du programme EURO-CORDEX, disponibles dans le rapport "Le climat de la France au XXIe siècle" (Ouzeau et al., 2014) et sur le site MétéoFrance "ClimateHD" (<http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd>).

Tableau 6 - Résumé des projections futures disponibles pour la zone du programme

Région	Model	Period	Scénario
<b>Sardaigne, Toscane et Ligurie</b>	COSMO-CLM	1981-2010 2021-2050 2071-2100	RCP4.5 et RCP8.5
<b>Corse et PACA</b>	Aladin-Climat WRF EURO-CORDEX	1976-2005 2021-2050 2071-2100	RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 RCP4.5, RCP8.5

Tableau 7 - Synthèse des indicateurs disponibles pour le domaine du programme

INDICATEURS REGION	TG	SU95P	HW	PRCPTOT	PRCPTOT JJA	CDD
	SARDAIGNE	x	x			x
TOSCANE	x	x			x	x
LIGURIE	x	x			x	x
CORSE	x		x	x	x	x
PACA	x		x	x	x	x

## Changement climatique attendu

### Sardaigne, Toscane, Ligurie

La figure 20 montre l'écart en termes de température moyenne pour les deux scénarios de référence (RCP4.5 et RCP8.5) des périodes 2021-2050 et 2071-2100 par rapport à la période de référence 1980-2010. L'augmentation est répartie de manière quasi uniforme sur l'ensemble du territoire, mais certaines différences sont sensibles tant au niveau du scénario retenu que de l'horizon temporel pris en considération.

En particulier, le scénario RCP4.5, celui avec une évolution des concentrations de gaz à effet de serre inférieure à RCP8.5, montre une augmentation d'environ 1,5 °C en Sardaigne et en Ligurie, alors que la Toscane reste en dessous de ce seuil. Le scénario RCP8.5, avec une concentration plus élevée de gaz altérant le climat dans l'atmosphère, indique une variation entre 1,5°C et 4,5°C. Considérant l'horizon temporel à long terme, l'augmentation des

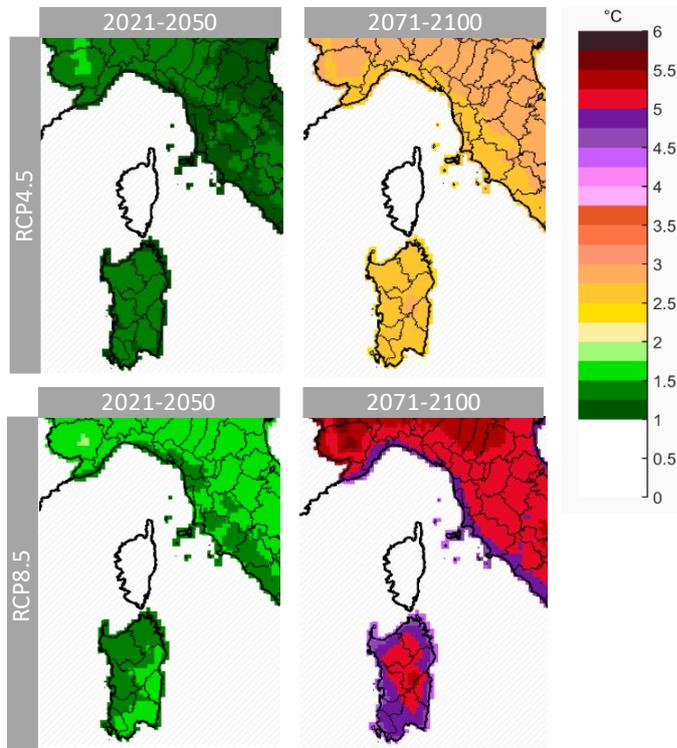


Figure 20 - Anomalies [°C] de la température moyenne pour la période 2021-2050 et 2071-2100 par rapport à la période de référence 1981-2010, selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

températures moyennes est encore plus marquée pour le scénario RCP8.5, et montre une différence d'un peu moins d'un demi-degré entre les zones côtières et intérieures.

En ce qui concerne l'indicateur SU95p (Figure 21), une augmentation généralisée sur toute la région est évidente du nombre de jours par an avec une température maximale supérieure à 29,2 ° C.

En particulier, pour l'horizon à court terme (2021-2050), le chiffre varie de +10 à +20 jours pour les deux scénarios. Les écarts sont plus marqués en observant les cartes relatives au long terme et surtout au scénario RCP8.5, pour lequel les simulations atteignent jusqu'à +60 jours par an. Le schéma spatial de l'augmentation du nombre de jours avec des températures estivales semble suivre la conformation géographique de la région du programme. En fait, les différences entre les zones plates (comme Campidano en Sardaigne) et les zones de montagne sont évidentes.

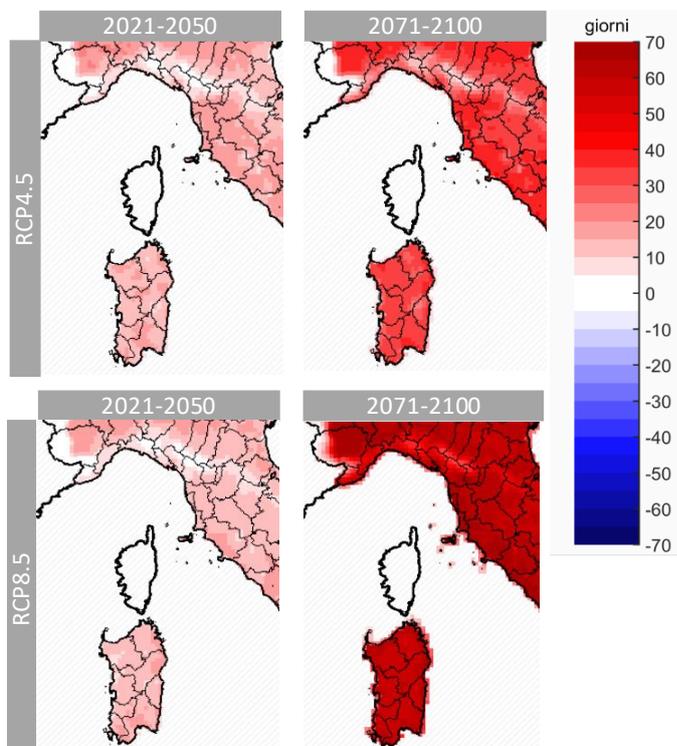


Figure 21 - Anomalies [jour] de l'indicateur SU95p pour la période 2021-2050 et 2071-2100, par rapport à la période de référence 1981-2010, selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5

Les variations des précipitations estivales dans les décennies à venir (Figure 22) indiquent de faibles différences sur la zone italienne lorsque l'on considère le scénario RCP4.5. Les projections à court terme montrent une diminution surtout dans le sud-est de la Sardaigne et dans la partie occidentale de la Ligurie, alors qu'il n'y a pas de tendance à la baisse à la frontière entre la Toscane et la Ligurie. La situation s'inverse à long terme, où l'on observe une nette diminution des précipitations estivales

dans toute la Ligurie et la Toscane, et une diminution plus légère en Sardaigne. Les projections avec le scénario RCP8.5 montrent plutôt une légère augmentation générale des précipitations en Sardaigne à court terme, et une diminution marquée à la fin du siècle. Enfin, conformément aux deux scénarios, une augmentation du nombre de jours consécutifs par an avec des précipitations inférieures à 1 millimètre est attendue (CDD, Figure 22). En particulier, si à court terme les deux scénarios diffèrent peu, les différences s'accroissent à long terme (2071-2100).

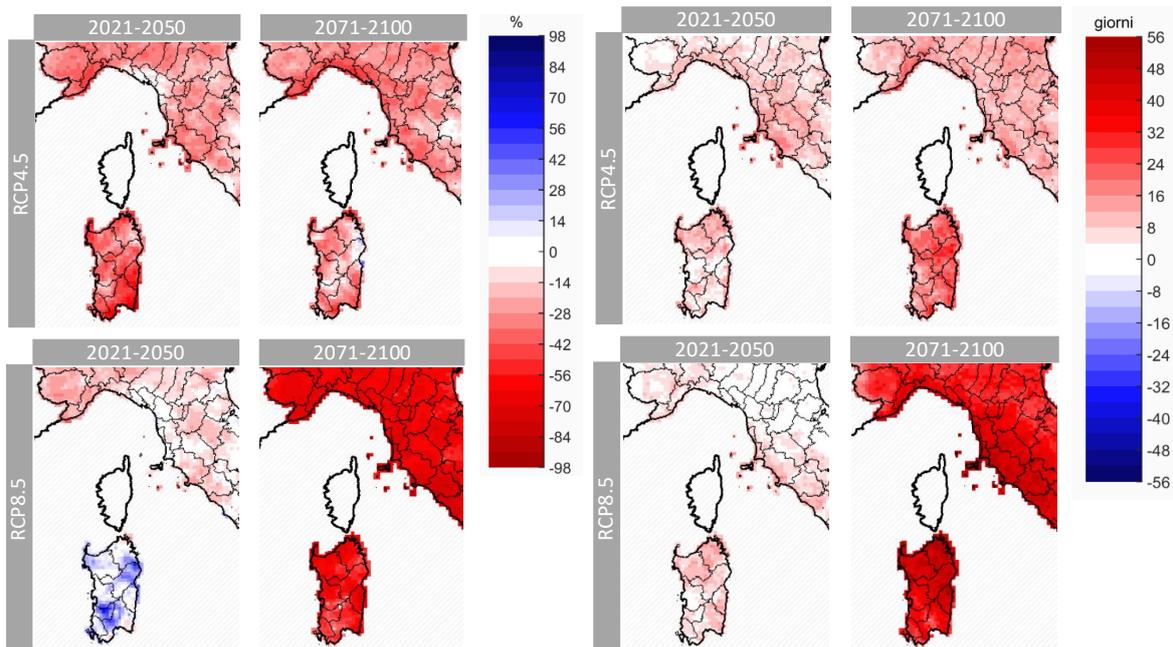


Figure 22 - Anomalies des précipitations estivales [%] et de l'indicateur CDD [jours] pour la période 2021-2050 et 2071-2100 par rapport à la période de référence 1981-2010, selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

### Corse et Région PACA

L'analyse du changement climatique dans les régions françaises (Corse et PACA) s'appuie sur les informations trouvées dans le rapport "Le climat de la France au 21ème siècle" (Ouzeau et al., 2014) et dans le site MétéoFrance "ClimatHD" (<http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd>).

Le rapport et le site Web "ClimateHD" sont basés sur deux modèles régionaux, Aladin-Climat et WRF, disponibles pour la période 1950-2100 et 1971-2100, respectivement, et pour les scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5. Les projections ont également été corrigées du biais avec les données observées. Par ailleurs, dans le but d'avoir une estimation de l'incertitude liée à la modélisation climatique, ces deux modèles sont associés à un ensemble de données issues de certains des modèles disponibles dans le cadre du programme EURO-CORDEX. En particulier, dans la cartographie de la distribution des projections, les valeurs moyennes pour une période de 30 ans qui se situent entre le minimum et le 25e centile de la distribution d'ensemble et celles qui sont au-delà du 75e centile sont présentées.

La Figure 23 montre l'évolution de la croissance des températures moyennes annuelles pour la Corse et la Région PACA jusqu'en 2100. Dans les deux régions, les projections climatiques montrent une augmentation des températures moyennes annuelles jusqu'en 2050 avec les deux scénarios RCP. L'évolution de cette augmentation diffère de la seconde moitié du XXIe siècle. Selon le RCP8.5 (scénario sans politique climatique), l'augmentation moyenne annuelle de la température pourrait atteindre 4°C d'ici 2071 à 2100.

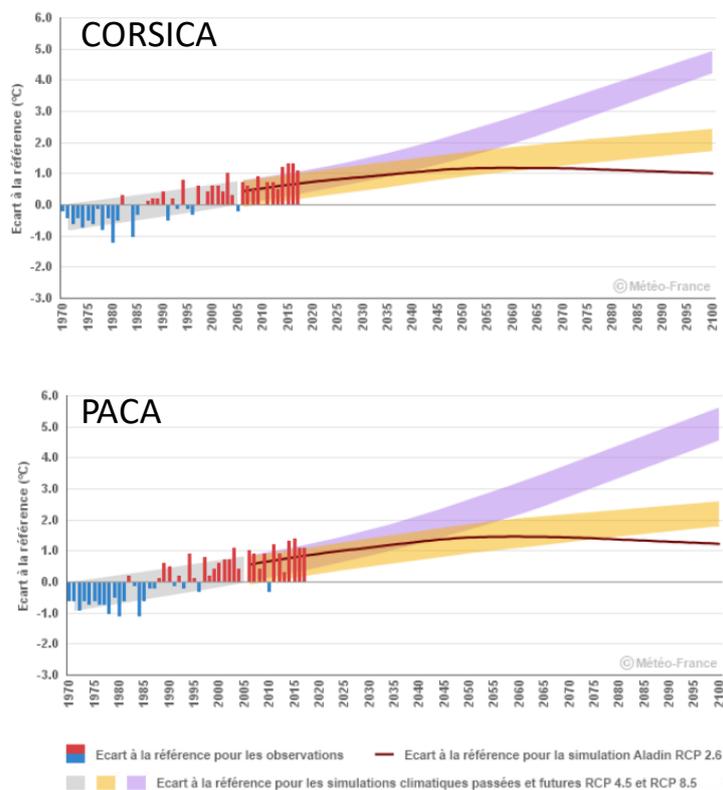


Figure 23 - Anomalies de la température moyenne annuelle en Corse et en région PACA : observations et projections avec les ensembles EURO-CORDEX avec les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 par rapport à la période de référence 1976-2005. Source: MétéoFrance

Avec le scénario RCP4.5 (Figure 24), à 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 français et notamment pour les régions d'influence méditerranéenne, en cohérence avec les simulations EURO-CORDEX. L'augmentation moyenne à la fin du XXIe siècle est à peine supérieure à celle de la première moitié de siècle, à l'exception d'Aladin-Climat, pour lequel le réchauffement s'élève à 3,5 °C dans l'est du pays, ce qui le place au-dessus de le 75e centile de l'ensemble EURO-CORDEX. De manière générale, pour le scénario le plus pessimiste et à la fin du siècle, on observe une augmentation qui pourrait atteindre 5°C en Corse et 6°C en Région PACA (Figure 25).

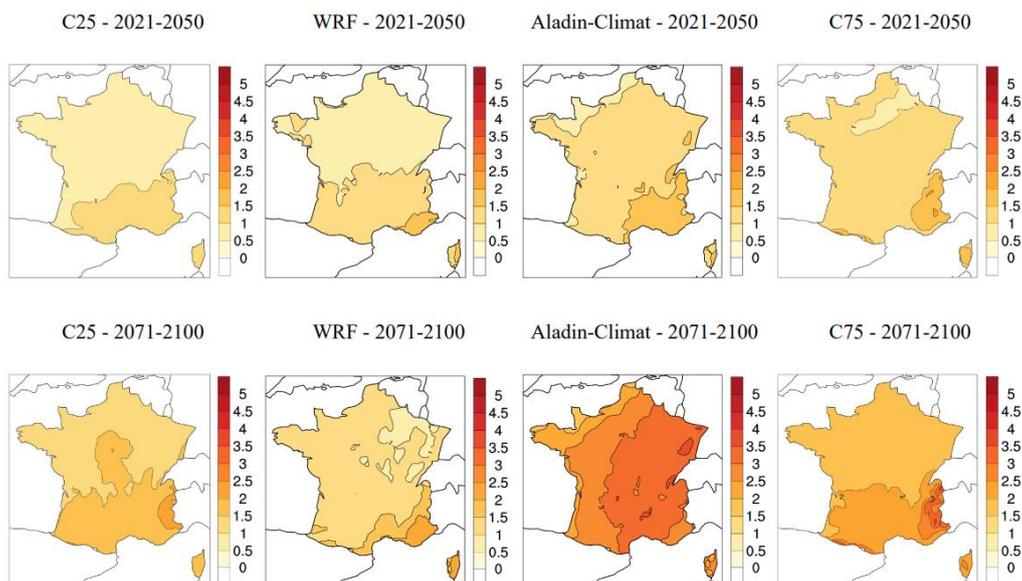


Figure 24 - Cartes de variation des températures estivales en France par rapport à la période de référence 1976-2005, pour le scénario RCP4.5, selon les horizons 2021-2050 et 2071-2100. De gauche à droite, 25e centile de l'ensemble EURO-CORDEX, WRF, Aladin-Climat, 75e centile de l'ensemble EURO-CORDEX. Modifié de Ouzeau et al., 2014

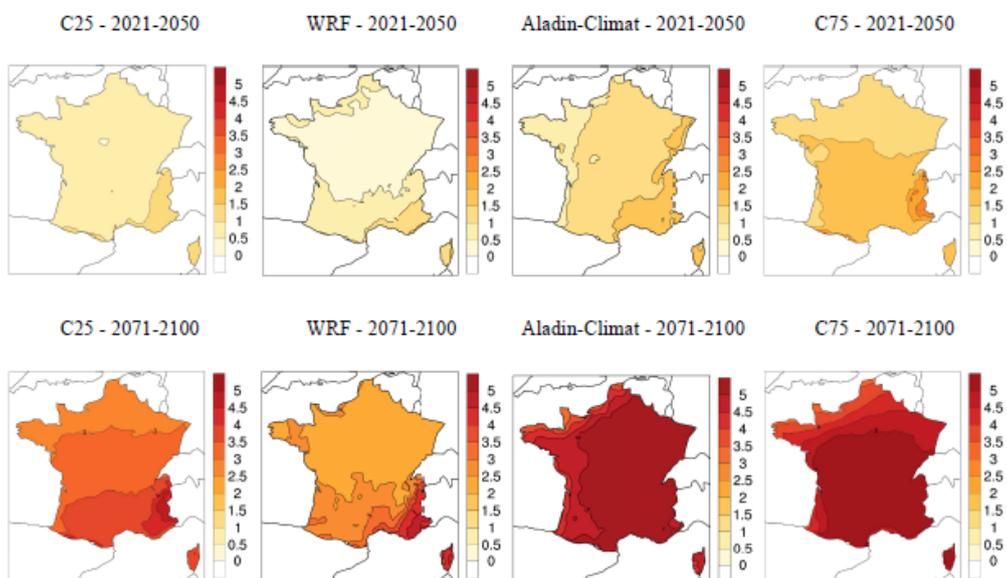


Figure 25 - Cartes de variation des températures estivales en France par rapport à la période de référence 1976-2005, pour le scénario RCP8.5, selon les horizons 2021-2050 et 2071-2100. De gauche à droite, 25e centile de l'ensemble EURO-CORDEX, WRF, Aladin-Climat, 75e centile de l'ensemble EURO-CORDEX. Modifié de Ouzeau et al., 2014

L'évolution des précipitations annuelles dans les prochaines décennies (Figure 26) n'indique pas de grandes différences par rapport à la période de référence. Cette absence de variation de la moyenne annuelle masque des contrastes saisonniers. Vers la seconde moitié du XXIe

siècle, en effet, les projections pour la période estivale montrent, notamment sous le scénario RCP8.5, une diminution des précipitations.

A l'horizon 2021-2050, les résultats associés au scénario RCP4.5 ne semblent pas montrer d'évolutions très marquées sur l'ensemble du territoire (Figure 27). On note également que le modèle WRF simule une augmentation des fortes précipitations près des côtes de la Manche et de l'Atlantique, ainsi qu'à proximité des régions de Savoie et au nord des Alpes. A la fin du siècle, les résultats ne permettent pas de identifier une tendance claire: en ce qui concerne l'évolution des précipitations estivales, les modèles WRF et Aladin-Climat sont en désaccord sur le signe du changement.

Les résultats associés au scénario RCP8.5 montrent en revanche une diminution des précipitations comprise entre 0,25 et 1 mm/jour sur la majeure partie du territoire français d'ici la fin du siècle (modèle Aladin-Climat) (Figure 27).

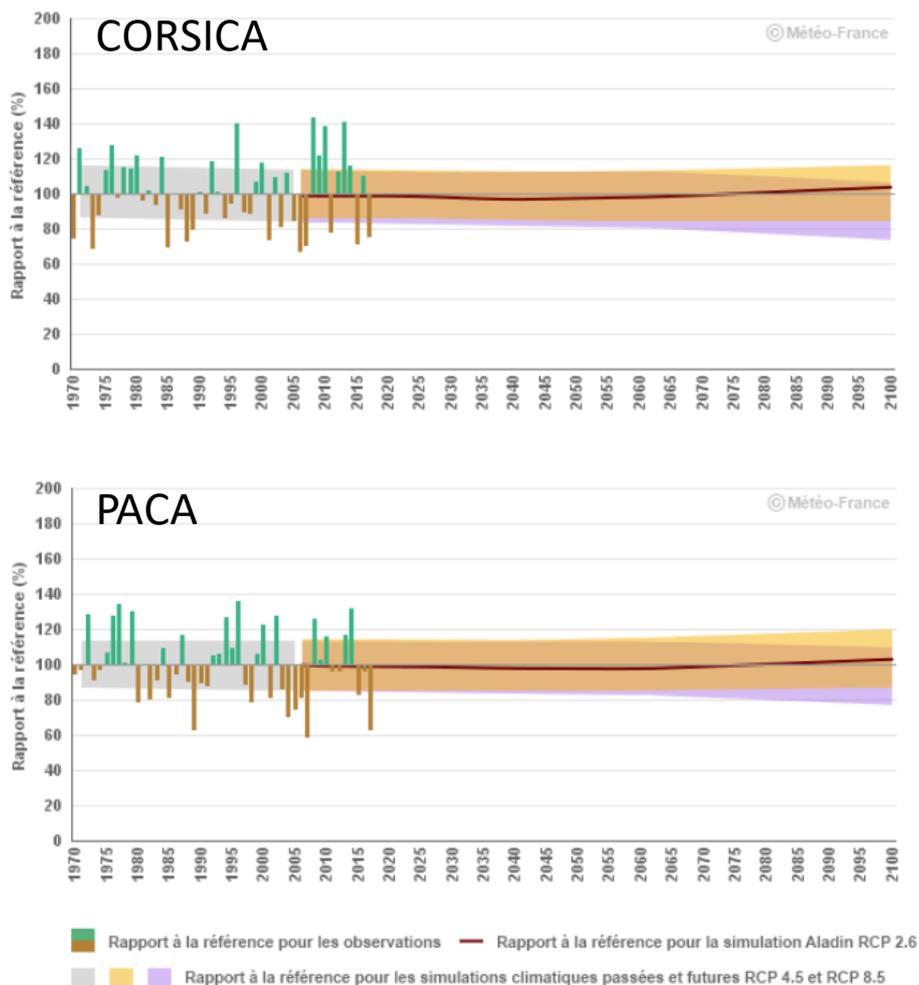


Figure 26 - Anomalies des précipitations annuelles en Corse et en région PACA : observations et projections avec les ensembles EURO-CORDEX avec les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 par rapport à la période de référence 1976-2005. Source: MétéoFrance

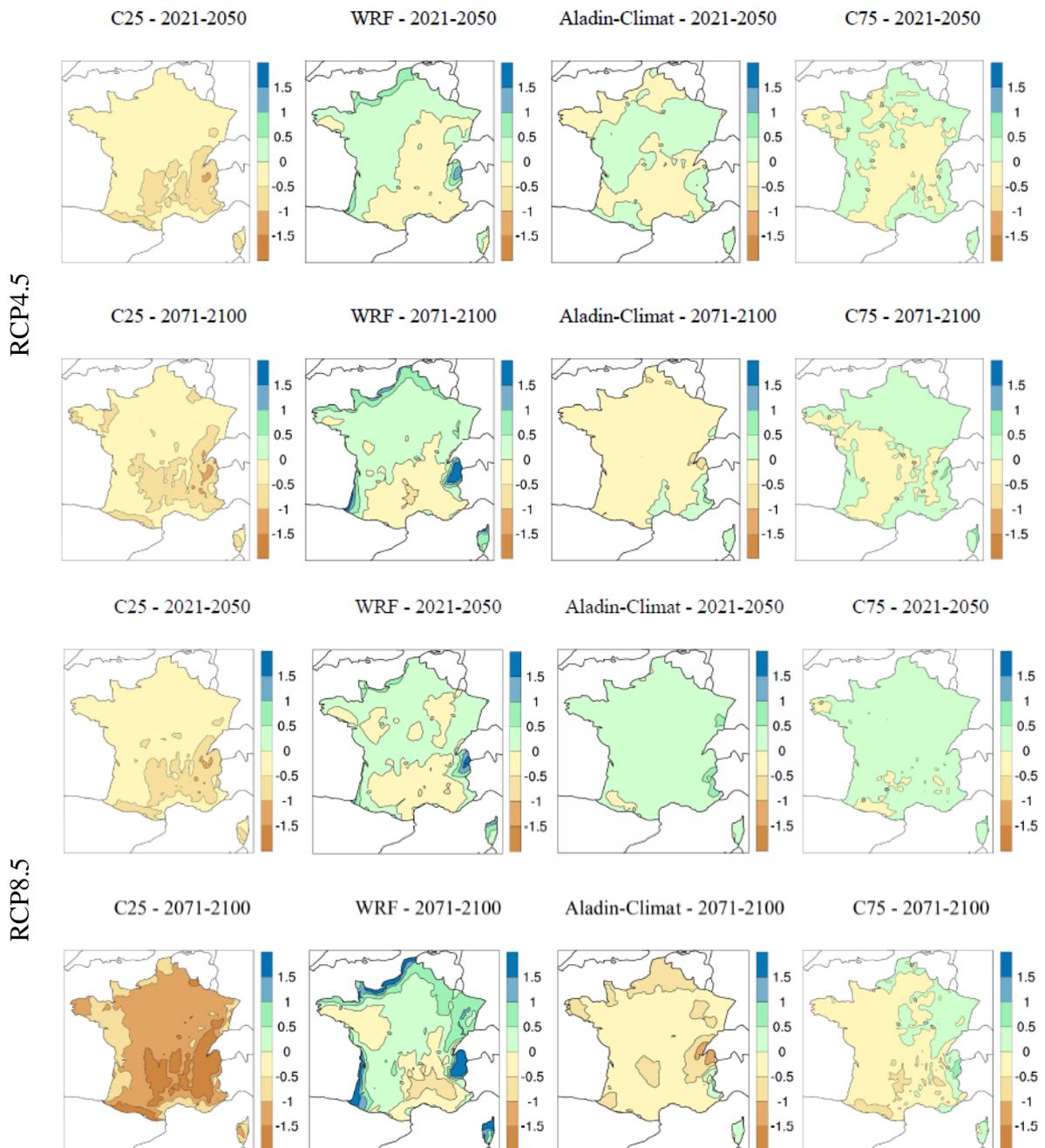


Figure 27 - Cartes de variation des précipitations estivales en France par rapport à la période de référence 1976-2005, pour le scénario RCP4.5 (premier et deuxième panneaux à partir du haut) et 8.5 (troisième et quatrième panneaux), selon les horizons 2021-2050 et 2071-2100. De gauche à droite, 25e centile de l'ensemble EURO-CORDEX, WRF, Aladin-Climat, 75e centile de l'ensemble EURO-CORDEX. Modifié de Ouzeau et al., 2014

La Figure 28 et la Figure 29 montrent les anomalies en termes de nombre de jours de canicule en été par rapport à la période de référence 1976-2005, pour les scénarios RCP4.5 et 8.5, selon les horizons 2021-2050 et 2071-2100. D'ici 2021-2050, tous les modèles simulent une augmentation de la variable considérée. Pour les deux scénarios considérés, l'augmentation

est modérée et varie de 0 à 5 jours sur l'ensemble du territoire, allant même jusqu'à 5 à 10 jours pour le scénario RCP4.5 dans les régions du sud-est.

Cette augmentation est encore plus importante au tournant du siècle et, pour le scénario RCP4.5, se situe entre 5 et 10 jours dans les régions occidentales et jusqu'à 20 jours dans la partie orientale du pays. Bien que l'ampleur du changement soit différente pour WRF et Aladin-Climat, les résultats montrent une augmentation globale plus forte vers le sud pour les deux modèles.

Ces résultats sont encore plus évidents pour le scénario RCP8.5, qui montre une augmentation du nombre de jours de canicule de 5 à plus de 20 jours de plus en moyenne en été (voire plus de 40 jours pour les régions du sud pour le model Aladin-Climat, qui simule certaines des valeurs les plus élevées de l'ensemble multi-modèles).

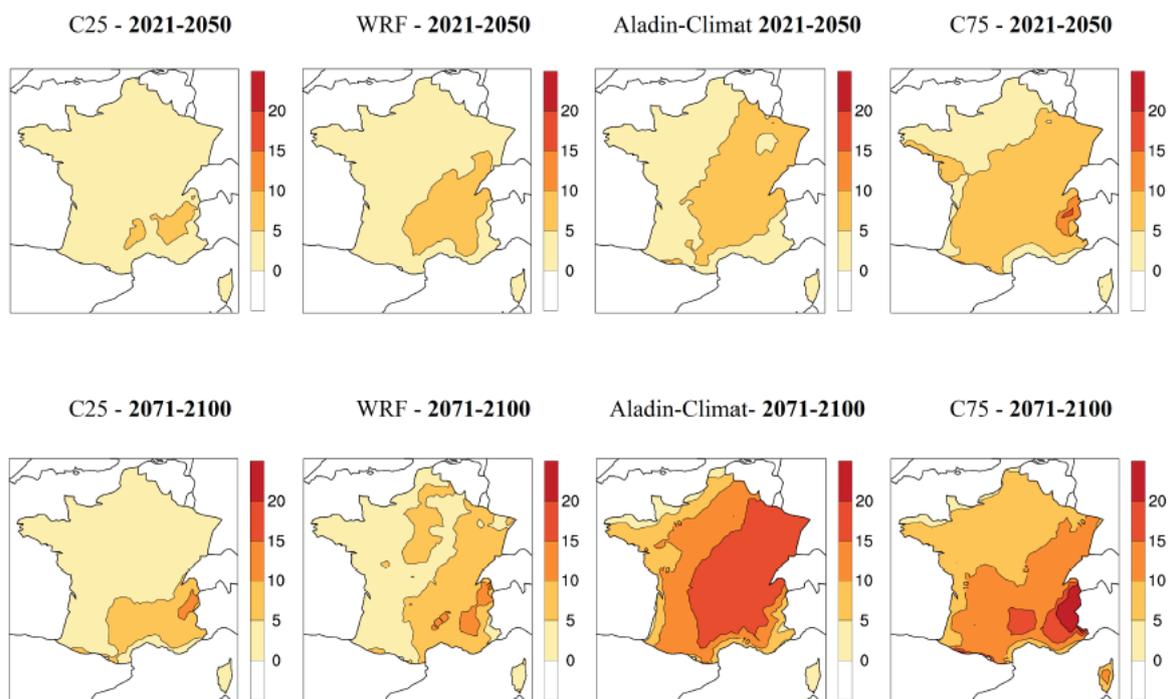


Figure 28 - Anomalie du nombre de jours de canicule en été en France par rapport à la période de référence 1976-2005, pour le scénario RCP4.5, selon les horizons 2021-2050 et 2071-2100. De gauche à droite, 25e centile de l'ensemble EURO-CORDEX, WRF, Aladin-Climat, 75e centile de l'ensemble EURO-CORDEX (modifié de Ouzeau et al., 2014)

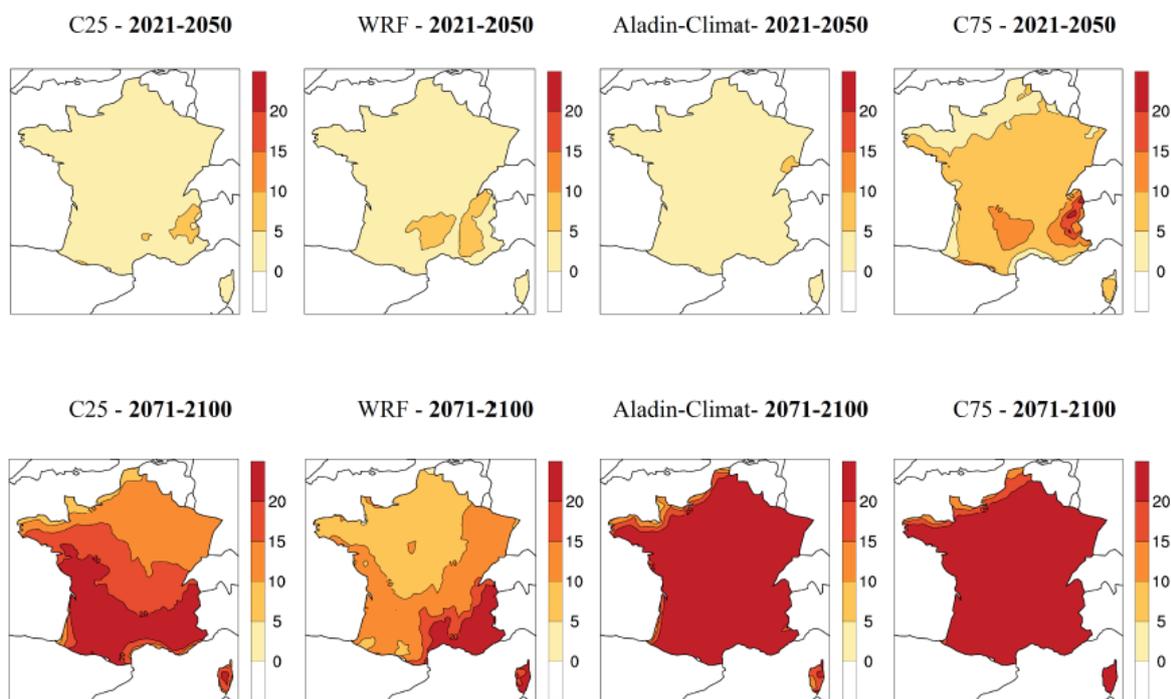


Figure 29 - Anomalie du nombre de jours de canicule en été en France par rapport à la période de référence 1976-2005, pour le scénario RCP8.5, selon les horizons 2021-2050 et 2071-2100. De gauche à droite, 25e centile de l'ensemble EURO-CORDEX, WRF, Aladin-Climat, 75e centile de l'ensemble EURO-CORDEX (modifié de Ouzeau et al., 2014)

Les Figures 30 et 31 montrent l'anomalie du nombre de jours de sécheresse, avec des précipitations inférieures à 1 mm en période estivale pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, pour les horizons 2021-2050 et 2071-2100. En général, dans la période historique, les régions méditerranéennes ont enregistré plus de 25 jours de sécheresse en été, même s'il faut noter que cette estimation est soumise à de fortes incertitudes, liées à les précipitations moyennes (données non présentées). De l'analyse des cartes d'anomalies, on constate que, sur l'horizon 2021-2050, les modèles WRF et Aladin-Climat sont en désaccord sur le signe de l'évolution du nombre de jours secs sur le territoire, avec des écarts par rapport à la période de référence n'excédant généralement pas à 2 jours, quel que soit le scénario de RCP considéré. D'ici 2071 à 2100, les écarts par rapport à la période de référence augmentent, mais les modèles WRF et Aladdin-Climate ne sont toujours pas d'accord sur le signe de cet écart. Cependant, les modèles semblent s'accorder sur une augmentation des épisodes de sécheresse dans le sud du pays, particulièrement dans le sud-est, avec 2 à 8 jours de sécheresse de plus que la période de référence selon le modèle considéré, pour le RCP4.5 scénario. Le nombre de jours secs simulés est amplifié si l'on considère le scénario RCP8.5 (Figure 31).

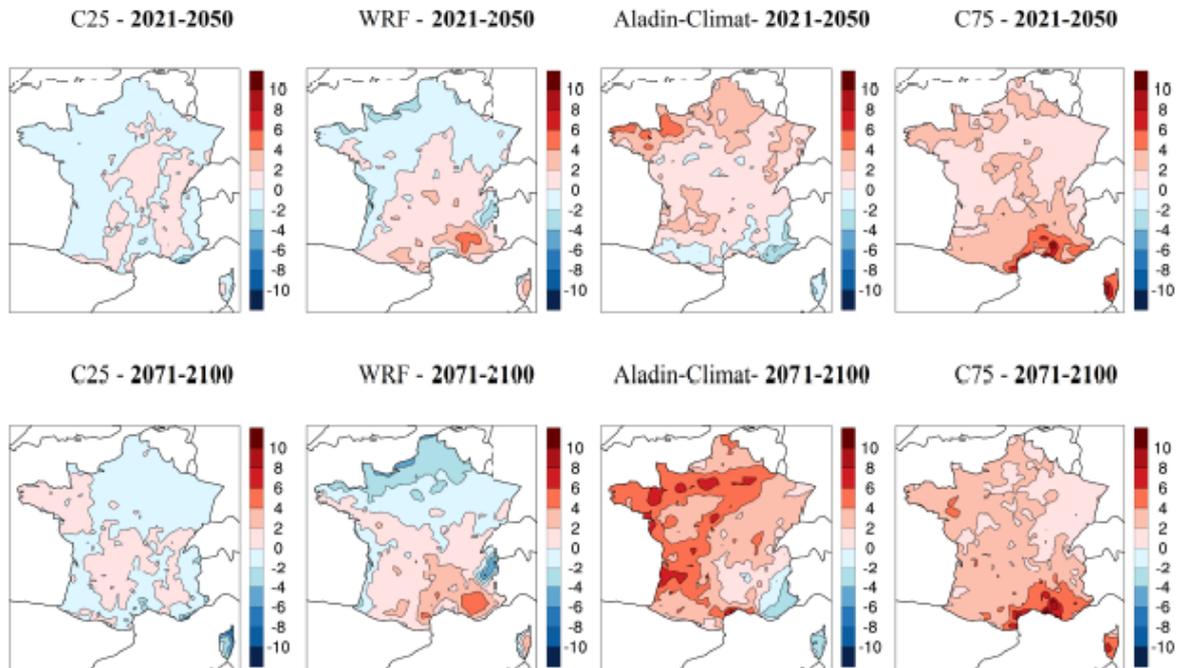


Figure 30 - Anomalie du nombre de jours consécutifs avec moins de 1 mm de précipitations en été en France par rapport à la période de référence 1976-2005, pour le scénario RCP4.5, selon les horizons 2021-2050 et 2071-2100. De gauche à droite, 25e centile de l'ensemble EURO-CORDEX, WRF, Aladin-Climat, 75e centile de l'ensemble EURO-CORDEX (modifié de Ouzeau et al., 2014)

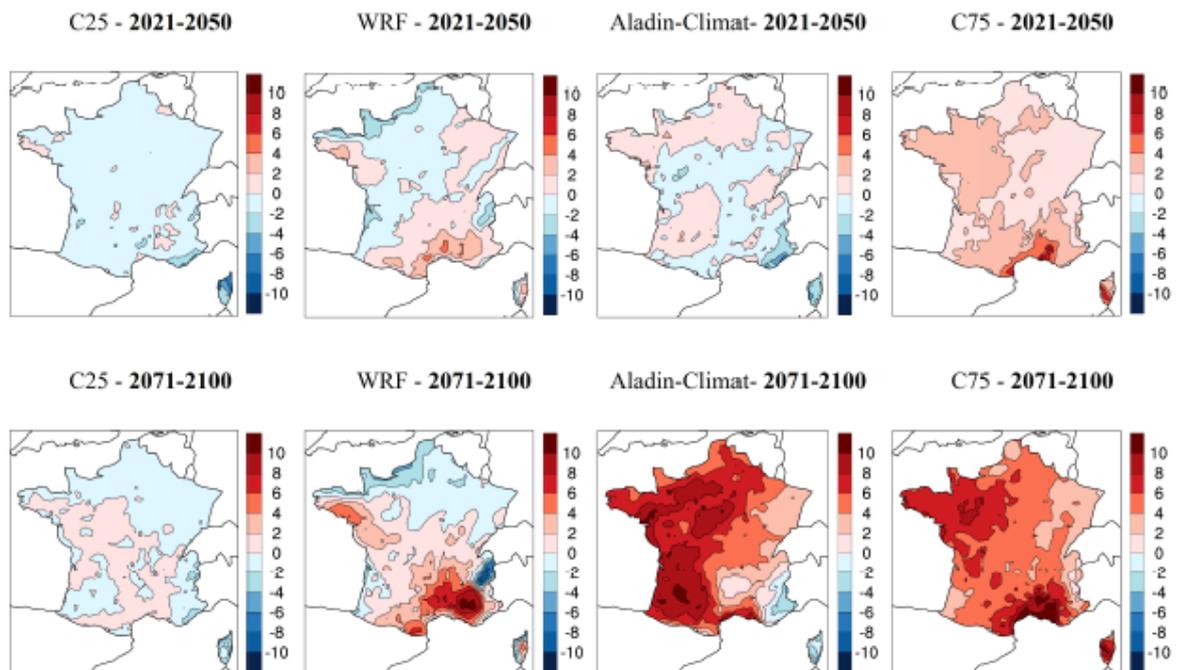


Figure 31 - Anomalie du nombre de jours consécutifs avec moins de 1 mm de précipitations en été en France par rapport à la période de référence 1976-2005, pour le scénario RCP8.5, selon les horizons 2021-2050 et 2071-2100. De gauche à droite, 25e centile de l'ensemble EURO-CORDEX, WRF, Aladin-Climat, 75e centile de l'ensemble EURO-CORDEX. Modifié de Ouzeau et al., 2014

## Les impacts potentiels du changement climatique sur les feux de forêt

L'interaction entre la hausse des températures, la réduction des précipitations annuelles moyennes, et une plus grande fréquence d'événements météorologiques extrêmes tels que les vagues de chaleur ou les sécheresses prolongées dues au changement climatique (comme vu dans le chapitre précédent) avec d'autres éléments sociaux économiques et de gestion (tels que l'abandon des zones cultivées, des pâturages et de celles qui étaient autrefois des forêts aménagées, et le fort exode vers les villes et les zones côtières) contribuent à rendre les zones du programme de plus en plus vulnérables aux risques d'incendies de forêts et à la survenance d'événements importants et destructeurs (Bovio et al., 2017), avec des répercussions sur les actifs anthropiques et les services écosystémiques.

Ce chapitre entend donc présenter une vue d'ensemble des impacts du changement climatique et les principales métriques relatives aux différentes composantes de l'activité des feux de forêt (danger, étendue de la zone brûlée, propagation et comportement, etc.). Pour atteindre cet objectif, les données les plus récentes et les articles disponibles spécifiques ou incluant le domaine du programme ont été collectés et analysés (Tableau 8).

Tableau 8 - Documents collectés sur les impacts potentiels du changement climatique sur les incendies

SOURCE	Area	Métrique	Period	Model	Scénario
Fargeon et al. 2020	France	FWI	1995-2015 2078-2098	3 GCM et 2 RCM EURO- CORDEX	RCP4.5 RCP8.5
Varela et al. 2019	PACA	FWI>50	2006-2015 2036-2045	2 GCM (CNRM-SMHI et MPI-SMHI) EURO- CORDEX	RCP4.5 RCP8.5
Copernicus ( <a href="https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/software/app-tourism-fire-danger-indicators-projections?tab=app">https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/software/app-tourism-fire-danger-indicators-projections?tab=app</a> )	Territoire du programme	FWI N ° jours avec FWI très élevé	1981-2005 2021-2040 2041-2060 2079-2098	EURO- CORDEX	RCP4.5 RCP8.5
Amatulli et al. 2013	EU-Med (Sud de la France, Italie)	Area parcourue	1961–1990, 2071–2100	1 RCM (HIRHAM) par 1 GCM (ECHAM) (PRUDENCE project)	A2 B2

Migliavacca et al. 2013	Europe	Area parcourue	1960–1990, 2010–2040, 2040–2070, 2070–2100	5 RCM-GCM (ENSEMBLES project)	A1B
Turco et al. 2018	EU-Med	Area parcourue	1971–2000, + 1.5, + 2, + 3 °C	9 simulations issues de la combinaison de 4 RCM et 5 GCM (EUROCORD EX)	RCP4.5 RCP8.5
Lozano et al. 2017	Italie + Corse	Valeurs moyennes et cartes de la probabilité de brûlure, de la longueur de la flamme et de la taille du feu	1981–2010, 2011–2040, 2041–2070	1 RCM (CMCC-CLM)	A1B

La première métrique analysée concerne le danger d'incendie (*Fire Danger* en anglais), défini comme une estimation de facteurs fixes et variables dans l'environnement du feu qui influencent la facilité d'allumage, la vitesse de propagation, la difficulté de contrôle et l'impact de l'incendie (Merrill et Alexander, 1987). Les modèles qui estiment ce danger, souvent constitués de modules qui représentent les caractéristiques d'humidité du combustible, peuvent donc être commodément utilisés pour décrire les impacts du changement climatique sur les incendies.

Actuellement, l'un des modèles de risque d'incendie les plus largement utilisés dans la littérature scientifique et à des fins opérationnelles est le *Fire Weather Index System (FWI)*, l'indice feux de forêt canadien. Ce modèle est également utilisé par le système européen d'information sur les incendies de forêt (EFFIS) et fournit une évaluation numérique (non dimensionnelle) du potentiel des incendies basés exclusivement sur des conditions météorologiques favorables au déclenchement et à la propagation du feu.

Deux études très récentes ont estimé le danger d'incendie et les métriques associées dans le sud de la France. Fargeon et ses collègues (2020) ont calculé le risque d'incendie à travers l'indice FWI pour la période juin-septembre de 1995 à 2098 selon deux scénarios d'émission (RCP4.5 et 8.5) en utilisant différents modèles de simulation tirés de l'expérience EURO-CORDEX (Kotlarski et al., 2014). Comme pour l'ensemble de la France, les données suggèrent une augmentation du danger d'incendie, mais montrent des différences importantes entre les scénarios d'émission. Le scénario RCP8.5 se caractérise en effet par une augmentation plus marquée par rapport au RCP4.5 après 2050. D'ici la fin du siècle, l'écart en pourcentage avec la période de contrôle (1995-2015) atteindra +24% pour les FWI inférieurs Scénario RCP4.5 et + 67% sous scénario RCP4.5. L'espace méditerranéen (Figure 32) se caractérise par un risque d'incendie beaucoup plus élevé que le reste du territoire français.

Les différences entre les scénarios sont visibles dans la plupart des cas dans le sud et l'ouest de la France, où le risque d'incendie est ou deviendra important et les plus grandes différences ont été observées dans l'ancienne région Languedoc-Roussillon et dans la région Corse.

Varela et ses collègues (2019) ont plutôt évalué le nombre de jours avec FWI au-dessus du seuil qui reflète à quel point le danger extrême d'incendies change dans le temps et l'espace (défini ici comme  $FWI > 50$ ). Les résultats de l'étude mettent en évidence un doublement potentiel du nombre de jours avec un danger d'incendie élevé à extrême dans de nombreux endroits de la zone d'étude (Figure 33). De plus, Varela et ses collègues (2019) s'attendent à une augmentation significative de la zone où  $FWI > 50$  se produit plus d'une semaine par saison des feux. Ce pourcentage passe de 5,8% dans la période historique à 18,5% dans le scénario RCP4.5 et 10,6% dans le scénario RCP8.5, et se concentre également dans ce cas dans le Var et dans la partie orientale de la Corse.

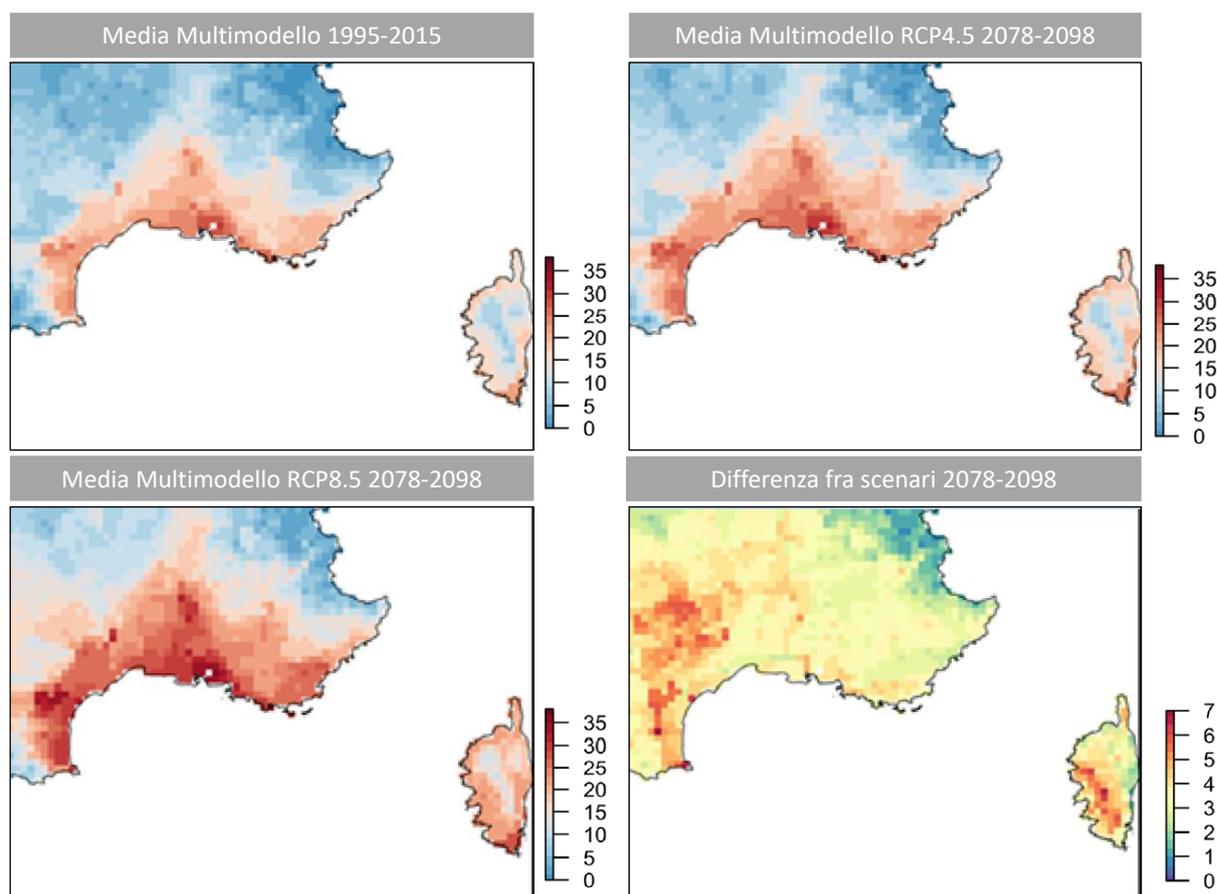


Figure 32 - Évolution de la distribution spatiale du FWI moyen pendant la saison des feux entre la période historique (1995-2006) (en haut à gauche) et le futur lointain (2078-2098) sous les deux scénarios RCP4.5 et 8.5 (respectivement en haut droite et en bas à gauche) et différence entre les deux scénarios (en bas à droite) (modifié de Fargeon et al., 2020)

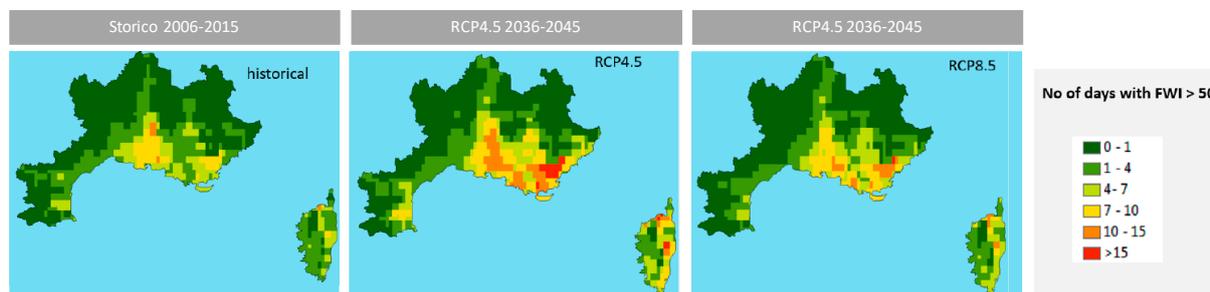


Figure 33 - De gauche à droite, carte du nombre de jours avec FWI > 50 par saison des feux, pour la période historique 2006-2015 et pour le futur proche 2036-2045, sous les deux scénarios RCP4.5 et 8.5 (modifié par Varela et al., 2019)

Dans le cadre du système Copernicus, le groupe NOA (National Observatory of Athens) a développé une application qui présente une évaluation à l'échelle européenne de l'indice FWI pour le climat actuel, calculé à partir des réanalyses ERA5, et des projections futures dérivées des modèles de circulation globale et les modèles climatiques régionaux. L'application fournit des statistiques multi-modèles et les futures projections FWI sont également corrigées à l'aide des réanalyses ERA5. Les valeurs FWI sont alors disponibles pour le climat actuel (1981-2005), le futur proche (2021-2040), le demi-siècle (2041-2060) et la fin du siècle (2079-2098). La Figure 34 représente la valeur FWI moyenne pour la saison des feux (juin-septembre) pour les trois périodes mentionnées et sous les scénarios d'émissions RCP4.5 et RCP8.5. Les valeurs sont reclassées en 6 classes de danger selon le système de classification EFFIS:

- *Très bas* (0.0 – 5.2)
- *bas* (5.2 – 11.2)
- *moyenne* (11.2 – 21.3)
- *haut* (21.3 – 38.0)
- *très haut* (38.0 – 50.0)
- *extreme* (50.0 – 100.0)

La Figure 35 montre plutôt la différence en termes de température moyenne pour les deux scénarios de référence (RCP4.5 et RCP8.5) des trois périodes futures considérées dans la période de référence 1981-2005. L'augmentation est répartie presque uniformément sur l'ensemble du territoire dans les deux premières périodes futures et selon les deux scénarios. On note une augmentation un peu plus importante en Sardaigne, en Toscane et dans les départements ouest de la région PACA dans le scénario RCP8.5, mais elle reste dans une fourchette de variation limitée (max +2,5 dans l'ancienne province d'Olbia-Tempio en 2021-2040 par rapport à la période historique et max +5,1 dans le Var en 2041-2060 par rapport à la période historique). Les écarts les plus importants sont toujours appréciables dans le scénario RCP8.5 et à long terme (2079-2098), où une variation saisonnière du FWI entre +7,4 dans la province de Gênes et +12,2 dans les anciennes provinces de Sassari et Olbia-Tempio est observé. Les données Copernicus projettent également le nombre de jours à risque très élevé pour les trois périodes futures et la période historique selon les deux scénarios d'émission (Figure 36). Dans ce cas également, une augmentation plus marquée est observée dans le scénario le plus pessimiste et à long période (2079-2098). Dans ce contexte, la région

Sardaigne enregistre le plus grand nombre de jours de danger très élevé par rapport aux autres régions (fourchette 50-100). La région qui, selon le scénario RCP4.5, enregistre la plus forte augmentation est la Sardaigne. A partir du milieu du 21ème siècle, en moyenne, plus de 10 jours par saison sont projetés avec un danger très élevé par rapport à la période témoin 1981-2005. Elle est suivie par la région PACA qui s'élève à plus de 7 jours (Tableau 9). Dans le scénario plus pessimiste, RCP8.5, il y a une nette différence par rapport au scénario plus modéré et une forte augmentation par rapport à la période de contrôle seulement à la fin du siècle. Dans ce cas également, la région qui pourrait connaître une augmentation moyenne plus importante en termes de nombre de jours de danger très élevé est la Sardaigne (+28 jours par rapport à la période historique), suivie de la région PACA (+20) et de la Toscane (+18).

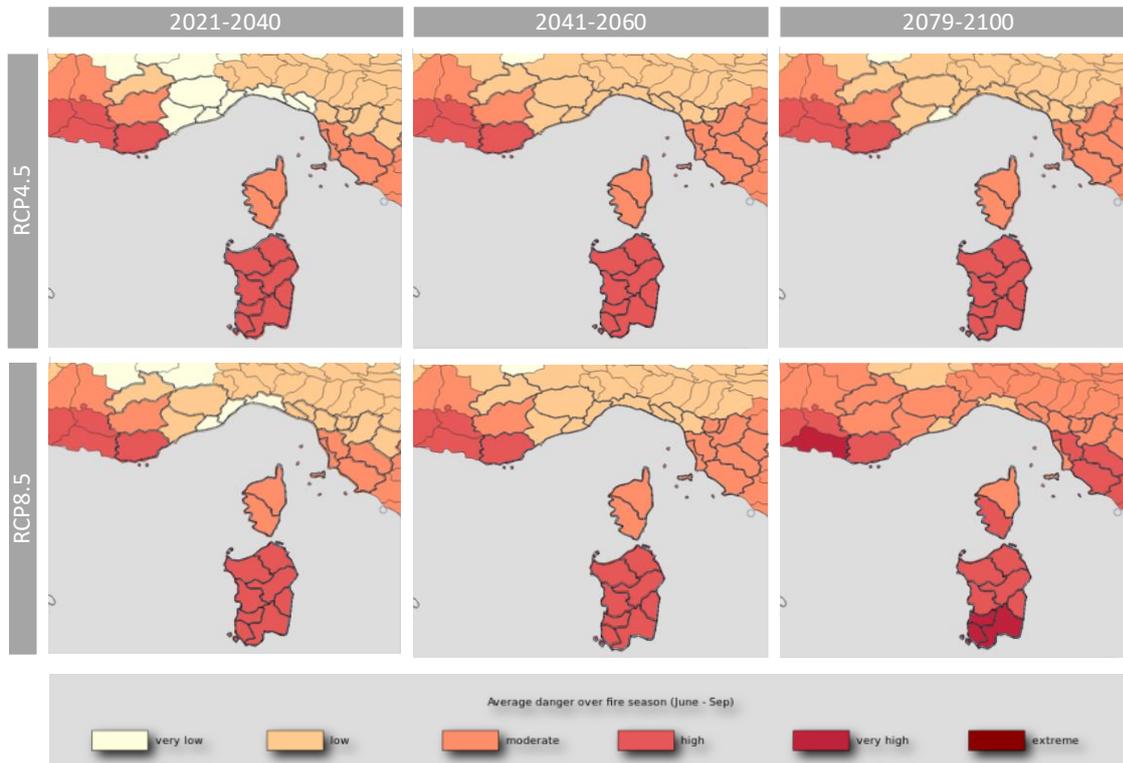


Figure 34 - Projections futures du FWI moyen saisonnier pour le futur proche (2021-2040), le demi-siècle (2041-2060) et la fin du siècle (2079-2098) selon les deux scénarios d'émissions RCP4.5 et RCP8.5. Source Copernicus

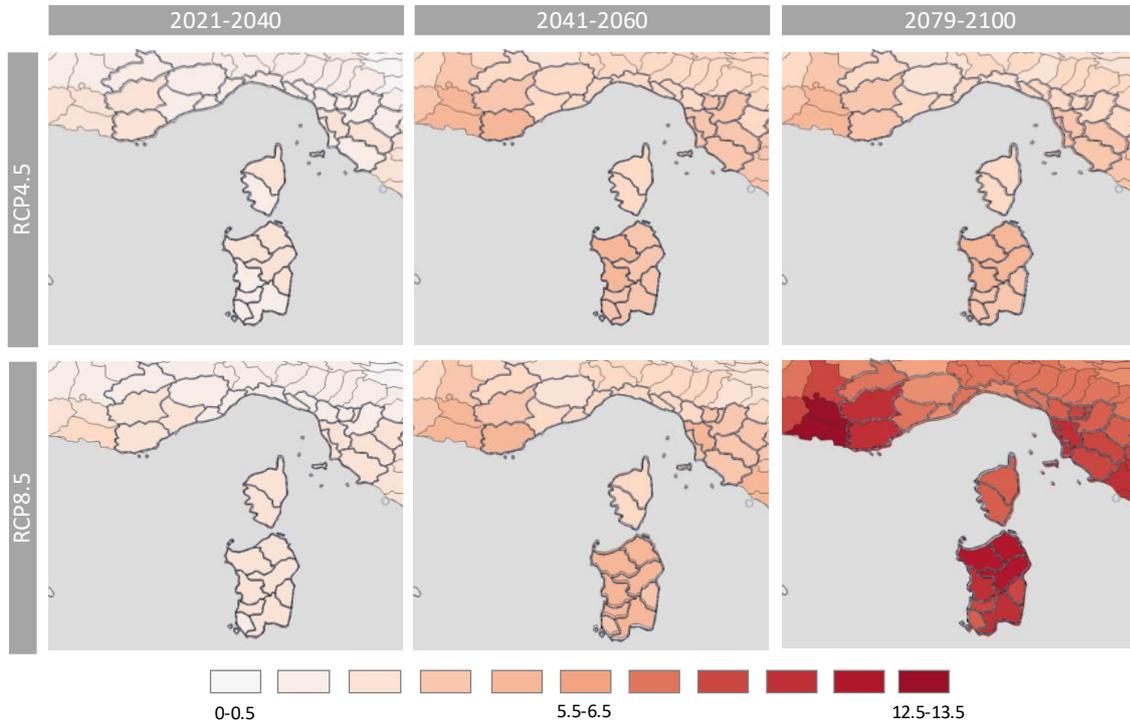


Figure 35 - Anomalies de la valeur moyenne saisonnière de FWI pour la période 2021-2040, 2041-2061 et 2079-2100 par rapport à la période de référence 1981-2005, selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Source Copernicus

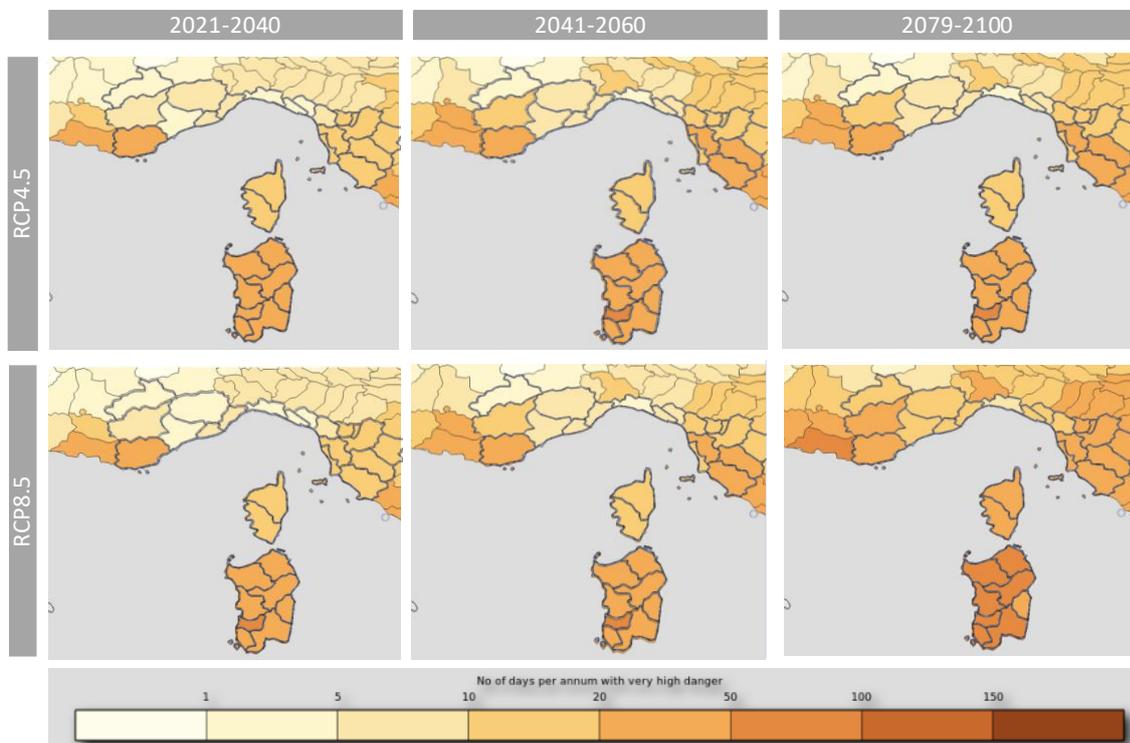


Figure 36 - Projections futures du nombre annuel de jours à très fort risque d'incendie pour le futur proche (2021-2040), le demi-siècle (2041-2060) et la fin du siècle (2079-2098) selon les deux scénarios d'émissions RCP4.5 et RCP8.5. Source Copernicus

Tableau 9 - Anomalies [nombre de jours] du nombre annuel de jours à très haut risque incendie pour la période 2021-2040, 2041-2061 et 2079-2100 par rapport à la période de référence 1981-2005, selon le RCP4.5 scénarios et RCP8.5. Source Copernicus

	RCP4.5			RCP8.5		
	2021-2040	2041-2060	2079-2098	2021-2040	2041-2060	2079-2098
<b>PACA</b>	+3	+7	+7	+3	+7	+20
<b>Corsica</b>	+3	+5	+6	+3	+6	+16
<b>Liguria</b>	+1	+3	+3	+1	+3	+10
<b>Toscana</b>	+3	+6	+6	+3	+7	+18
<b>Sardegna</b>	+5	+10	+11	+5	+12	+28

L'allongement de la saison des incendies et l'augmentation des jours à très haut danger se traduiront par une augmentation des surfaces parcourues. Plusieurs études ont estimé cette métrique à l'échelle européenne (eg, Amatulli et al., 2013; Migliavacca et al., 2013; Turco et al., 2018; Wu et al., 2015) et à travers différentes approches (modèles statistiques ou biogéochimiques, tels que Dynamic Global Vegetation Models - DGVM).

Par exemple, Amatulli et al. (2013) combinant l'aléa incendie (FWI, calculé à partir d'un modèle climatique unique, RCM (HIRHAM) piloté par un GCM (ECHAM), et deux scénarios d'émission, A2 et B2) avec différents modèles statistiques, valorisent pour l'espace euro-méditerranéen une augmentation dans la zone brûlée sur la période 2071-2100 par rapport à la période 1985-2004 de 66% à 140%, selon le scénario considéré. Pour la France méditerranéenne, en revanche, une augmentation de 75% dans le scénario B2 et de 129% dans le scénario A2 est attendue. L'augmentation projetée est au contraire plus contenue pour l'Italie, où l'étude estime une augmentation de la surface brûlée de 21% à 43% pour l'Italie, là encore selon que l'on considère le scénario B2 ou le scénario A2. Cependant, il faut considérer que dans leur article, Amatulli et ses collègues (2013) ne prennent pas en considération non plus les activités d'atténuation des risques (extinction, lutte active), qui seront plutôt mises en œuvre pour limiter les impacts des incendies sur les biens et les personnes, ou le rôle joué par la végétation.

Migliavacca et ses collègues (2013) appliquent une approche de modélisation plus sophistiquée capable de prendre en compte ces aspects clés grâce à l'utilisation d'un modèle biogéochimique (le *Community Land Model*). Les estimations résultantes de cette étude semblent être plus prudentes que celles d'Amatulli et ses collègues (2013). En effet, pour la fin du siècle (2070-2100), et sous le scénario A1B, Migliavacca et ses collègues (2013) estiment une augmentation de la surface brûlée de 37% pour l'Europe méditerranéenne par rapport à la période 1960-1990. Bien que pas facile à visualiser, sur la Figure 37, la Sardaigne peut être considérée comme la région du territoire du programme la plus touchée par l'augmentation de la superficie brûlée, en particulier pour le milieu et la fin du siècle.

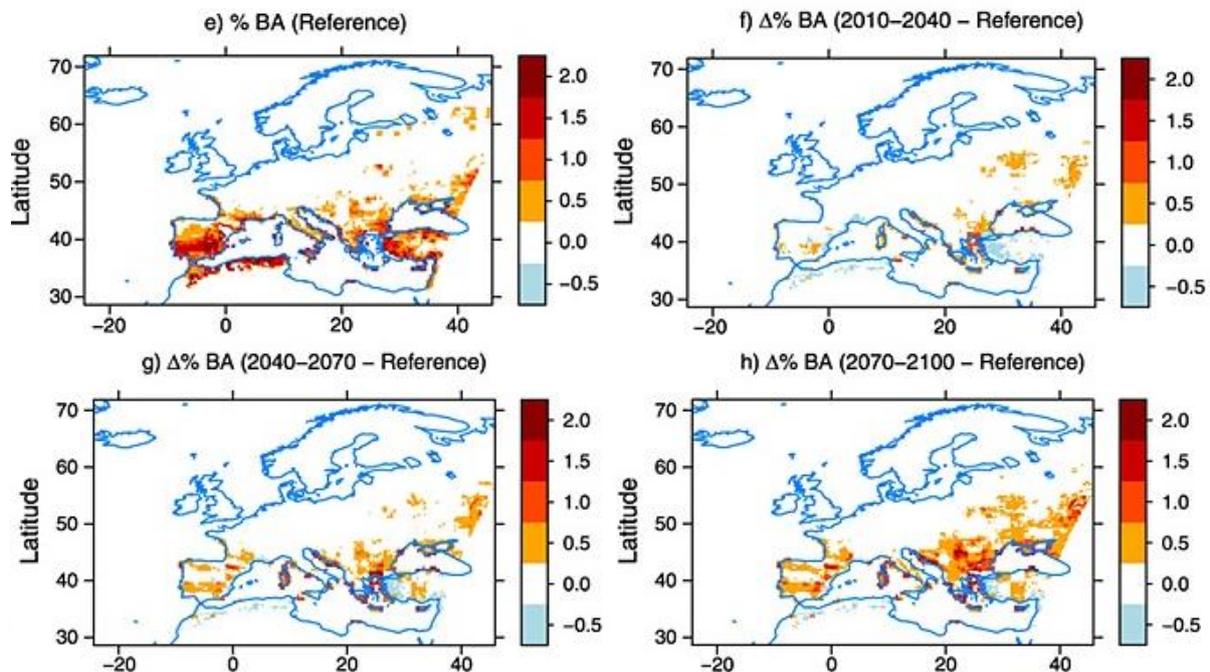


Figure 37 - Carte de la fraction de cellule couverte par le feu (% BA) pour la période témoin (1960-1990) et des anomalies pour les différentes périodes futures (2010-2040, 2040-2070 et 2070-2100). Modifié à partir de: Migliavacca et al., (2013)

Récemment, Turco et ses collègues (2018) ont estimé la superficie brûlée en été en Europe méditerranéenne d'ici la fin du siècle, en considérant trois scénarios de réchauffement climatique (1,5°, 2° et 3°C). L'approche utilisée dans ce travail a vu l'application d'un modèle statistique qui a estimé l'influence du climat sur la superficie brûlée grâce à l'utilisation de l'indice SPEI (indice normalisé d'évapotranspiration des précipitations) comme prédicteur climatique. De plus, Turco et ses collègues (2018) ont également évalué deux types de modèles, stationnaires (SM) et non stationnaires (NSM). La première ne considère que les liens directs entre le climat et les incendies, tandis que la seconde inclut également les effets indirects potentiels des changements induits par le climat sur la productivité de la végétation et donc sur la disponibilité du combustible.

L'étude, considérant ce cas particulier de modèle non stationnaire, fait état d'une augmentation de la surface brûlée notamment pour le scénario de chauffage 3°C. La région PACA semble être la plus touchée par la hausse, qui oscille entre 50% de plus (scénario 1,5°C) que dans la période 1971-200 jusqu'à 100% (scénario 3°C) (Figure 38).

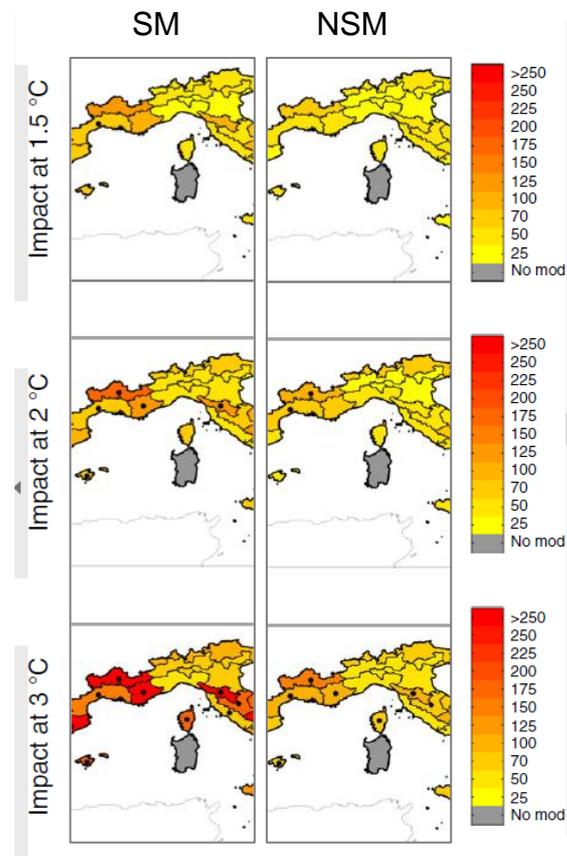


Figure 38 - Variation en pourcentage de la surface brûlée pour les scénarios d'augmentation de température à 1,5°C, 2°C, 3°C et pour le modèle stationnaire (SM) et non stationnaire (NSM). Les points indiquent les domaines où au moins 50 % des simulations montrent un changement statistiquement significatif et plus de 66 % sont d'accord avec la direction du changement. Les zones colorées sans points indiquent que les changements sont faibles par rapport aux variations naturelles. Les zones grises indiquent qu'aucune donnée n'est disponible. Modifié à partir de: Turco et al. (2018)

Enfin, à ce jour, peu d'études ont traité de la simulation des impacts du changement climatique sur les métriques relatives à la propagation des incendies (par exemple, probabilité d'allumage dans une zone donnée, longueur de flamme, voire taille des incendies) en Europe méditerranéenne. Un travail récent de Lozano et ses collègues (2017) a considéré ces aspects au niveau italien et pour la Corse. L'étude a appliqué des modèles de propagation de nouvelle génération couplés au modèle climatique CMCC-CLM sous le scénario d'émission A1B et estimé les différences en pourcentage des différentes métriques considérées entre les périodes futures 2011-2040 et 2041-2070 et la période de contrôle 1981-2010.

Quant à la Corse, les résultats montrent une diminution dans les deux périodes, plus marquée pour le plus proche, en ce qui concerne la probabilité que le territoire soit traversé par des incendies et la possibilité d'incendies majeurs dans le futur. Au lieu de cela, une petite augmentation de la longueur de la flamme est notée au cours de la deuxième période future. La Sardaigne, en revanche, affiche une augmentation de moins de 5% dans la deuxième période de toutes les métriques, à l'exception de la longueur de flamme. L'augmentation de la

probabilité que le territoire soit traversé par des incendies et de l'ampleur des incendies futurs apparaît plus marquée en Toscane que dans toute l'Italie centrale (+ 7% en deuxième période par rapport à la période de contrôle), tandis qu'en en Ligurie comme dans tout le nord-ouest de l'Italie, il y a eu une baisse marquée, en tout cas inférieure à 5%. Ces résultats, expliquent les auteurs, sont dus à la combinaison de types de combustibles arbustifs (maintenus constants dans toutes les simulations et périodes) et aux impacts du changement climatique sur l'humidité du combustible et sur le régime des vents, capables d'alimenter et d'influencer un degré différent de propagation du feu et affecter la longueur de la flamme.

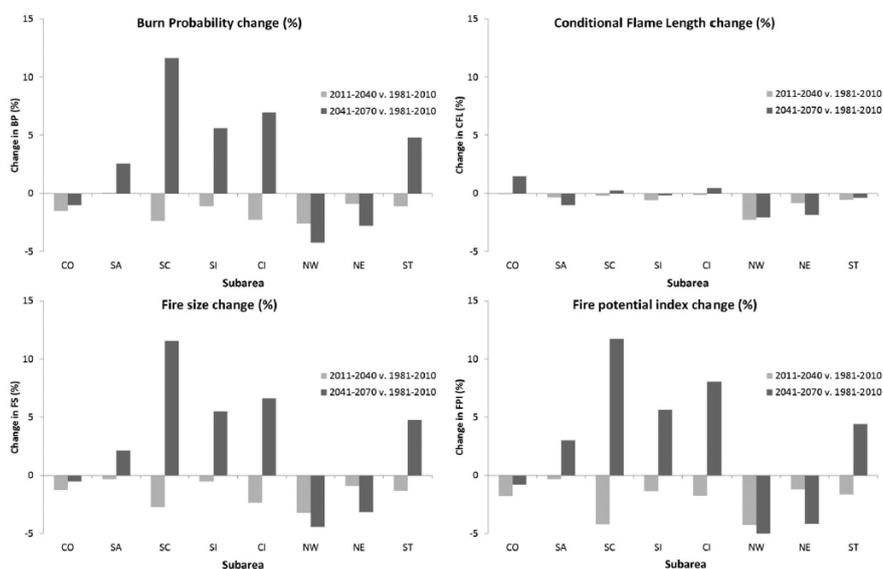


Figure 39 - Variation des paramètres relatifs à la propagation et au comportement du feu (probabilité de combustion (BP), longueur de flamme conditionnelle (CFL), taille du feu (FS) et indice de potentiel de feu (FPI)) entre la période de contrôle (1981-2010) et périodes futures (2011-2040 et 2041-2070). CO = Corse, SA = Sardaigne, SC = Sicile, SI = Sud de l'Italie, CI = Centre de l'Italie, NW = Nord-Ouest de l'Italie, NE = Nord-Est de l'Italie, ST = Zone d'étude. Source: Lozano et al., (2017)

## Références bibliographiques - Riferimenti bibliografici

- Amatulli, G., Camia, A., San-Miguel-Ayanz, J., 2013. Estimating future burned areas under changing climate in the EU-Mediterranean countries. *Sci. Total Environ.* 450–451, 209–222. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.014>
- Bovio, G., Marchetti, M., Tonarelli, L., Salis, M., Vacchiano, G., Lovreglio, R., Elia, M., Fiorucci, P., Ascoli, D., 2017. Forest fires are changing: let's change the fire management strategy. *For. - Riv. di Selvic. ed Ecol. For.* 14, 202–205. <https://doi.org/10.3832/efor2537-014>
- Fargeon, H., Pimont, F., Martin-StPaul, N., De Caceres, M., Ruffault, J., Barbero, R., Dupuy, J.L., 2020. Projections of fire danger under climate change over France: where do the greatest uncertainties lie? *Clim. Change* 160, 479–493. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02629-w>
- Gibelin Anne-Laure; Dubuisson Brigitte; Corre Lola; Deaux Nathalie; Jourdain Sylvie; Laval Laurence; Piquemal Jean-Michel; Mestre Olivier; Dennetière Denis; Desmidt Stéphanie; Tamburini Agnès (2014) Évolution de la température en France depuis les années 1950 : constitution d'un nouveau jeu de séries homogénéisées, *La Météorologie* 87
- IPCC, 2014. Summary for policymakers, in: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects.* Cambridge University Press, pp. 1–32.
- IPCC, 2018. Summary for Policymakers, in: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J.B.R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M.I., E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T.W. (Eds.), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change.*
- IPCC, 2019. Summary for Policymakers, in: Shukla, P.R., Skea, J., Buendia, E.C., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., van Diemen, R., Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Pereira Portugal, J., Vyas, P., Huntley, E., Kissick, K., Belkacemi, M., Malley, J. (Eds.), *Limte Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems.*
- Kotlarski, S., Keuler, K., Christensen, O.B., Colette, A., Déqué, M., Gobiet, A., Goergen, K., Jacob, D., Lüthi, D., Van Meijgaard, E., Nikulin, G., Schär, C., Teichmann, C., Vautard, R., Warrach-Sagi, K., Wulfmeyer, V., 2014. Regional climate modeling on European scales: A joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geosci. Model Dev.* 7, 1297–1333. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1297-2014>
- LaMMA (2010). PAL - Programma di Azione Locale di lotta alla siccità e alla desertificazione. Reperibile al [link](https://www.minambiente.it/sites/default/files/archivio/allegati/desertificazione/Relazione_finale_PAL_Toscana_x2x.pdf) [https://www.minambiente.it/sites/default/files/archivio/allegati/desertificazione/Relazione\\_finale\\_PAL\\_Toscana\\_x2x.pdf](https://www.minambiente.it/sites/default/files/archivio/allegati/desertificazione/Relazione_finale_PAL_Toscana_x2x.pdf)
- Lionello, P., Scarascia, L., 2018. The relation between climate change in the Mediterranean region and global warming. *Reg. Environ. Chang.* 18, 1481–1493. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1290-1>
- Lozano, O.M., Salis, M., Ager, A.A., Arca, B., Alcasena, F.J., Monteiro, A.T., Finney, M.A., Del Giudice, L., Scoccimarro, E., Spano, D., 2017. Assessing Climate Change Impacts on Wildfire Exposure in Mediterranean Areas. *Risk Anal.* 37, 1898–1916. <https://doi.org/10.1111/risa.12739>
- Merrill, D.F., Alexander, M.E., 1987. Glossary of forest fire management terms. Ottawa, ON.
- Migliavacca, M., Dosio, A., Camia, A., Hobourg, R., Houston-Durrant, T., Kaiser, J.W., Khabarov, N., Krasovskii, A.A., Marcolla, B., San Miguel-Ayanz, J., Ward, D.S., Cescatti, A., 2013. Modeling biomass burning and related carbon emissions during the 21st century in Europe. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 118, 1732–1747. <https://doi.org/10.1002/2013JG002444>
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., Van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., Wilbanks, T.J., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature.* <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- OUZEAU, G., DÉQUÉ, M., JOUINI, M., PLANTON, S., VAUTARD, R. 2014. Scénarios régionalisés :

- édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer. Le climat de la France au XXI<sup>e</sup> siècle, Volume 4, Août 2014, rapport de la mission Jean Jouzel, Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, Direction générale de l'Énergie et du Climat, 64 pp.
- Spano D., Mereu V., Bacciu V., Marras S., Trabucco A., Adinolfi M., Barbato G., Bosello F., Breil M., Chiriaco M. V., Coppini G., Essenfelder A., Galluccio G., Lovato T., Marzi S., Masina S., Mercogliano P., Mysiak J., Noce S., Pal J., Reder A., Rianna G., Rizzo A., Santini M., Sini E., Staccione A., Villani V., Zavatarelli M., 2020. "Analisi del rischio. I cambiamenti climatici in Italia". DOI: 10.25424/CMCC/ANALISI\_DEL\_RISCHIO
- Spano et al. (2014) Recent trends in forest fires in Mediterranean areas and associated changes in fire regimes. In: Moreno J, editor. Forest fires under climate, social and economic changes in Europe, the Mediterranean and other fire-affected areas of the world. FUME. Lesson learned and outlook; 2014. p. 6–7.
- Turco, M., Rosa-Cánovas, J.J., Bedia, J., Jerez, S., Montávez, J.P., Llasat, M.C., Provenzale, A., 2018. Exacerbated fires in Mediterranean Europe due to anthropogenic warming projected with non-stationary climate-fire models. Nat. Commun. 9. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06358-z>
- van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M. et al. (2011) The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change 109, 5 <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Varela, V., Vlachogiannis, D., Sfetsos, A., Karozis, S., Politi, N., Giroud, F., 2019. Projection of Forest Fire Danger due to Climate Change in the French Mediterranean Region. Sustainability 11, 4284. <https://doi.org/10.3390/su11164284>
- Wu, M., Knorr, W., Thonicke, K., Schurgers, G., Camia, A., Arneth, A., 2015. Sensitivity of burned area in Europe to climate change, atmospheric CO<sub>2</sub> levels, and demography: A comparison of two fire-vegetation models. J. Geophys. Res. Biogeosciences 120, 2256–2272. <https://doi.org/10.1002/2015JG003036>

## Sitographie - Sitografia

<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/software/app-tourism-fire-danger-indicators-projections?tab=app>

<http://www.sar.sardegna.it/pubblicazioni/miscellanea/ReportClima1981-2010.pdf>

<https://delibere.regione.sardegna.it/protected/45525/0/def/ref/DBR45368/>

[https://www.researchgate.net/publication/264539774\\_Clima\\_che\\_cambia\\_-\\_Uno\\_sguardo\\_sulla\\_Toascana](https://www.researchgate.net/publication/264539774_Clima_che_cambia_-_Uno_sguardo_sulla_Toascana)

[https://www.minambiente.it/sites/default/files/archivio/allegati/desertificazione/Relazione\\_finale\\_PAL\\_Toscana\\_x2x.pdf](https://www.minambiente.it/sites/default/files/archivio/allegati/desertificazione/Relazione_finale_PAL_Toscana_x2x.pdf)

[https://www.arpal.liguria.it/contenuti\\_statici/clima/atlante/Atlante\\_climatico\\_della\\_Liguria.pdf](https://www.arpal.liguria.it/contenuti_statici/clima/atlante/Atlante_climatico_della_Liguria.pdf)

<http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd>