



À quel climat s'adapter en France selon la TRACC ? partie 2

Jean-Michel Soubeyroux, Sébastien Bernus, Brigitte Dubuisson, Agathe Drouin, Thumette Madec, Fabienne Rousset, Raphaëlle Samacoïts, Michel Schneider, Marc Tardy, Flore Tocquer, et al.

► To cite this version:

Jean-Michel Soubeyroux, Sébastien Bernus, Brigitte Dubuisson, Agathe Drouin, Thumette Madec, et al.. À quel climat s'adapter en France selon la TRACC ? partie 2. Meteo-France. 2025, pp.46. hal-04991790

HAL Id: hal-04991790

<https://hal.science/hal-04991790v1>

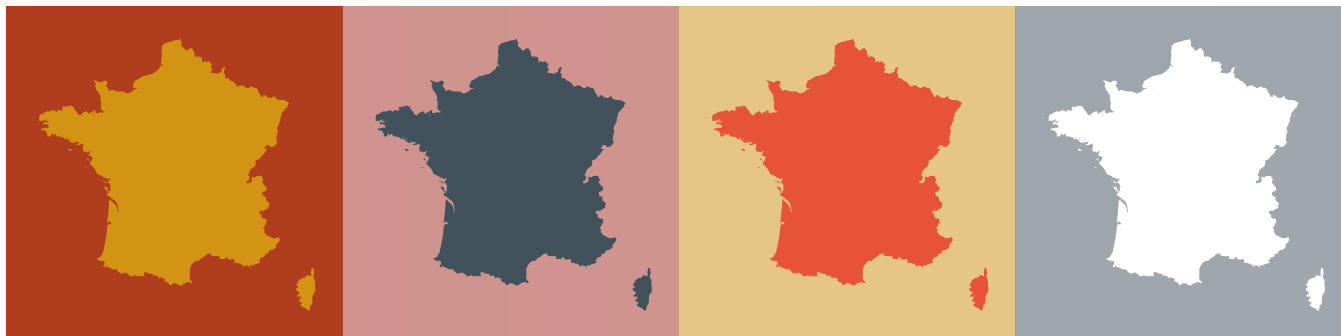
Submitted on 14 Mar 2025

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

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



Open licence - etalab



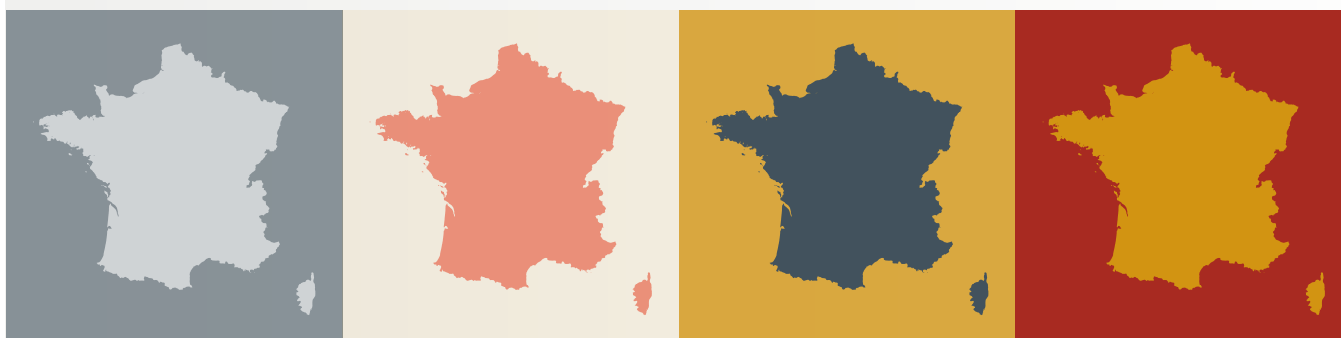
LA FRANCE S'ADAPTE >

Vivre à +4°C

À quel climat s'adapter
en France selon la TRACC ?

Partie 2

Variabilité, extrêmes et
impacts climatiques



Introduction

Les effets du changement climatique sont désormais largement observés en France, influençant profondément l'ensemble des activités et des territoires.

Afin de limiter les conséquences du changement climatique, l'action climatique repose sur deux approches indissociables : l'atténuation ou décarbonation, visant à la baisse des émissions de gaz à effet de serre liées aux activités humaines (objectifs de l'accord de Paris) et l'adaptation, permettant de réduire les impacts des changements déjà engagés. La définition des stratégies d'adaptation nécessite de connaître aussi précisément que possible les évolutions climatiques futures en vue de s'y adapter.

À ce jour, les actions climatiques définies ou engagées au niveau international induisent un risque de dépasser le seuil des +2°C de réchauffement planétaire fixé par l'accord de Paris, auquel il convient de se préparer. Les autorités françaises ont ainsi défini en 2023 une Trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC) visant à établir de manière cohérente à quel climat s'adapter tout au long du 21^e siècle, et permettant notamment de se préparer à un réchauffement de +4°C sur la France hexagonale en fin de siècle.

Météo-France a été chargé de produire les données et indicateurs climatiques décrivant le climat et ses aléas aux différents jalons de cette trajectoire d'adaptation, et de mettre à disposition ces informations sur le portail « [DRIAS, les futurs du climat](#) ». Le territoire hexagonal et la Corse disposant d'informations plus complètes sur les futurs climatiques que les régions d'outre-mer, il a été traité en premier. Les informations correspondantes pour les régions d'outre-mer seront fournies dans un deuxième temps. Dans ce rapport, le terme France se référera au seul territoire hexagonal avec la Corse.

L'objectif de ce rapport est de rassembler et de synthétiser les informations et les données climatiques de la TRACC sur la France, pour en faciliter la prise en main par une large palette d'acteurs.

Ce rapport est divisé en deux parties :

Partie 1 : Concepts et données de base sur les températures et les précipitations (publié en fin 2024, en téléchargement : hal.science/hal-04797481v3) ;

Partie 2 : Variabilité, extrêmes et impacts climatiques.

Cette seconde partie s'intéresse à la variabilité climatique interannuelle (qu'on entend ici comme les fluctuations des valeurs de précipitations et de températures d'une année à l'autre), aux différents extrêmes climatiques (températures, précipitations, sécheresse et vent) et aux impacts en matière de ressource en eau, enneigement en montagne et risques de feux de forêt. Ces informations sont essentielles pour dimensionner les actions d'adaptation.

La méthodologie de construction de la TRACC (Corre et al, 2025), les jeux de données disponibles pour la représenter et les diagnostics sur l'évolution des températures moyennes et les cumuls de précipitation qui ont été présentés dans le premier volume du rapport TRACC, ne sont pas repris ici.

Sommaire

Introduction.....	2	5. Quelle évolution de la ressource en eau et la sécheresse du sol ?.....	28
Sommaire.....	3	Évolution de l'évapotranspiration potentielle (ETP).....	28
1. Comment décrire l'évolution de la variabilité, des extrêmes et des impacts climatiques ?.....	4	Évolution du bilan hydrique (pluie - ETP).....	29
Qu'est-ce qu'un indicateur climatique et comment le calculer ?.....	4	Évolution de l'humidité du sol.....	30
Période de référence, climat récent et climat actuel.....	6	Évolution de la sécheresse du sol avec les narratifs.....	31
Climat futur : différences entre scénarios climatiques et la TRACC.....	6	Évolution des événements de sécheresse du sol.....	33
Approche statistique et approche narrative.....	6	En résumé pour la ressource en eau et la sécheresse du sol.....	34
2. Quelle évolution de la variabilité interannuelle ?.....	8	6. Quelle évolution du risque de feux ?.....	35
Quelle évolution de la variabilité interannuelle ?.....	8	En résumé pour le risque de feux.....	37
Quelle évolution de la variabilité en hiver ?.....	10	7. Quelle évolution de l'enneigement en montagne ?.....	38
Quelle évolution de la variabilité en été ?.....	13	En résumé pour l'enneigement en montagne.....	40
En résumé pour la variabilité interannuelle.....	16	8. Quelle évolution des tempêtes ?.....	41
3. Quelle évolution des extrêmes de température ?.....	17	En résumé pour les tempêtes.....	42
Quelle évolution des extrêmes chauds ?.....	17	Synthèse.....	43
Évolution des extrêmes froids.....	23	Bibliographie.....	44
En résumé pour les extrêmes de température.....	24	Remerciements.....	45
4. Quelle évolution des pluies intenses ?.....	25	Liste des auteurs.....	45
En résumé pour les pluies intenses.....	27		

1. Comment décrire l'évolution de la variabilité, des extrêmes et des impacts climatiques ?

Qu'est-ce qu'un indicateur climatique et comment le calculer ?

Un climat se définit à la fois par les valeurs moyennes annuelles et saisonnières d'un ensemble de variables (dont en premier lieu les températures et les précipitations) mais aussi par ses valeurs extrêmes. De nombreuses activités sont également sensibles à la variabilité interannuelle de ces variables (c'est-à-dire leurs fluctuations d'une année à l'autre).

Le changement climatique, qui peut modifier l'ensemble de la distribution de ces valeurs en un lieu donné, affecte la plupart des activités socio-économiques et des milieux naturels selon leur sensibilité aux moyennes et aux extrêmes des différentes variables climatiques (températures, précipitations, neige, humidité de l'air, vent, rayonnement solaire...) et hydrologiques (évaporation, humidité du sol, débits des cours d'eau...).

Un indicateur est défini pour être représentatif d'une des caractéristiques du climat (moyen, extrêmes) ou de ses impacts sur une activité ou un milieu. Il est construit à partir de différents traitements plus ou moins complexes, sur des variables climatiques classiques (températures, précipitations, humidité du sol, enneigement, etc.).

L'indicateur peut ainsi être construit à partir de l'agrégation spatiale et / ou temporelle d'une variable (température moyenne annuelle sur la France), d'un nombre de jours au-dessus ou en dessous d'un seuil (nombre de jours de forte chaleur), de la valeur maximum ou minimum d'une variable (pluie quotidienne maximale annuelle), de traitements statistiques (médiane, quantiles...) ou de la combinaison de plusieurs variables (par exemple indice caractérisant le risque de feux de forêt).

Un indicateur peut être présenté par sa valeur sur une période donnée (historique ou future) ou par un écart (ou écart relatif) par rapport à sa valeur sur une période de référence.

Certains indicateurs, notamment ceux utilisés pour décrire les événements extrêmes comme les vagues de chaleur ou les sécheresses, peuvent combiner plusieurs des traitements élémentaires évoqués ci-dessus.

La liste et la définition des indicateurs considérés dans la suite de ce rapport sont présentées dans le **tableau 1** ci-dessous.

On utilisera régulièrement dans ce rapport les notions de quantile et de médiane, qui permettent de synthétiser les valeurs prises par un ensemble de données. Du point de vue statistique, le quantile détermine le nombre de valeurs d'une distribution au-dessus ou en dessous d'un certain seuil. Ainsi, par définition, 95 valeurs sur 100 dans un ensemble de nombres sont supérieures au quantile 5% (dépassé en conséquence que dans 95% des cas), une valeur sur deux est inférieure (ou supérieure) à la médiane (quantile 50%), 5 valeurs sur 100 sont supérieures au quantile 95% (dépassé dans 5% des cas).

On peut également compléter la description d'un ensemble de données par ses valeurs maximales et minimales (*figure 1*).

Cette approche peut être utilisée à la fois :

- du point de vue spatial : la médiane donne la valeur inférieure (ou supérieure) atteinte sur la moitié du territoire à l'échelle de la France. La médiane spatiale est plus pertinente que la valeur moyenne sur un territoire lorsque différentes valeurs sont observées dans certaines zones (montagne par exemple), ou lorsqu'il s'agit d'indicateurs fondés sur des seuils (nombre de jours supérieurs ou inférieurs à une valeur donnée). La valeur médiane agrégée sur la France est souvent complétée par une information sur une zone géographique particulière. Par exemple, sur la période de référence 1976–2005, la médiane spatiale du nombre de nuits chaudes en France est de 2 nuits, tandis que la valeur maximale sur le littoral méditerranéen est de l'ordre de 60 jours. Par la suite, on utilisera le terme « à l'échelle de la France » pour considérer cette valeur médiane spatiale sur le pays.

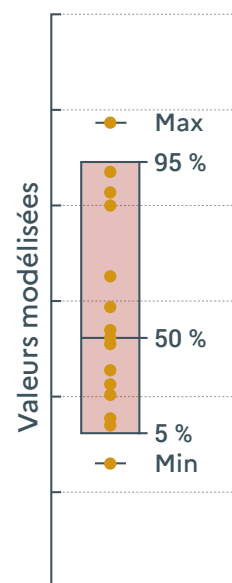


Figure 1 :
Représentation des valeurs prises par un ensemble de 17 points à travers la médiane, les quantiles 5 et 95 et les valeurs min et max.

Indicateurs	Définitions et périodes de référence utilisées	Unité
Moyenne des températures sur l'année, l'hiver ou l'été	Moyenne des températures moyennes quotidiennes de la période (année, hiver, été). ☞ moyenne sur 20 (ou 30) ans ou écart par rapport à la référence 1976–2005 ☐ moyenne sur une zone d'intérêt ou sur la France	°C
Cumul des précipitations sur l'année, l'hiver ou l'été	Cumul sur la période des précipitations quotidiennes (année, hiver, été) ☞ moyenne sur 20 (ou 30) ans ou écart (ou écart relatif) par rapport à la référence 1976–2005 ☐ moyenne sur une zone d'intérêt ou la France	mm ou %
Nombre de jours de très forte chaleur	Nombre de jours sur l'année pour lequel la température maximale quotidienne est supérieure à 35 °C ☞ moyenne sur 20 (ou 30) ans ou écart par rapport à la référence 1976–2005 ☐ médiane ¹ France	jours
Température maximale du jour le plus chaud de l'année	Valeur de température maximale la plus élevée sur l'année ☞ moyenne ou maximum sur 20 (ou 30) ans ou écart à la référence 1976–2005 ☐ médiane ou maximum sur la France	°C
Nombre de nuits chaudes	Nombre de jours sur l'année pour lequel la température minimale est supérieure à 20 °C ☞ moyenne sur 20 (ou 30) ans ou écart à la référence 1976–2005 ☐ médiane France	jours
Indicateurs de vagues de chaleur	Voir l'encart C	
Nombre de jours de gel	Nombre de jours sur l'année pour lequel la température minimale est inférieure à 0 °C ☞ moyenne sur 20 (ou 30) ans ou écart à la référence 1976–2005 ☐ médiane France	jours
Précipitation quotidienne maximale annuelle	Journée la plus pluvieuse pour une année donnée ☞ moyenne sur 20 (ou 30) ans ou écart à la référence 1976–2005 ☐ médiane France	mm ou %
Evapotranspiration potentielle (ETP)	Somme sur l'année de l'ETP quotidienne selon la formule Penman Monteith FAO ☞ moyenne sur 20 (ou 30) ans ou écart relatif à la référence 1976–2005 ☐ médiane France	mm ou %
Bilan Hydrique (BH)	Différence au pas de temps annuel entre le cumul de précipitation et l'ETP ☞ Moyenne sur 20 ans ou écart à la référence 1976–2005 ☐ Médiane France	mm
Nombre de jours de sol sec	Nombre de jours sur l'année pour lequel l'indice d'humidité du sol (SWI) est inférieur à 0,4 (seuil de stress hydrique marqué pour la végétation) ☞ moyenne sur 20 (ou 30) ans ou écart à la référence 1976–2005 ☐ médiane France	jours
Indicateurs de sécheresse du sol	Voir l'encart D	
Nombre de jours propices à un risque de feux élevé	Nombre de jours sur l'année pour lequel l' indice IFM est supérieur à 40 (seuil risque élevé) ☞ moyenne sur 20 (ou 30) ans ou écart à la référence 1976–2005 ☐ médiane France	jours
Nombre de jours avec neige au sol en montagne	Nombre de jours (sur l'année ou par mois) pour lequel la hauteur de neige est supérieure à 5 cm ☞ moyenne sur 20 (ou 30) ans ou écart à la moyenne 1976–2005 ☐ médiane par massif et par altitude (ou écart à la référence 1976–2005)	jours
Hauteur moyenne de neige	Moyenne des valeurs de hauteur quotidienne de neige de la période (année, mois) ☞ moyenne sur 20 (ou 30) ans ou écart à la référence 1976–2005 ☐ moyenne par massif et par altitude	cm
Vent moyen quotidien maximal annuel	Vent moyen quotidien maximal pour une année donnée ☞ moyenne sur 20 (ou 30) ans ou écart à la référence 1976–2005 ☐ médiane France	m/s

Tableau 1 : Liste des indicateurs climatiques utilisés dans la 2^e partie du rapport TRACC

1. Médiane : La médiane est le point milieu d'un jeu de données, de sorte que 50% des données ont une valeur inférieure ou égale à la médiane et 50% des données ont une valeur supérieure ou égale.

- du point de vue statistique, en considérant notre ensemble de 17 simulations pour lesquelles on a calculé des quantiles en chaque point, puis à l'échelle de la France. On peut ainsi dire qu'à l'échelle de la France (médiane spatiale), la médiane multi-modèle du nombre de nuits chaudes dans une France à +4°C est de 24 nuits tandis que le quantile 5% est de 18 jours et le quantile 95% de 28 jours.

Il est à noter que dans ce rapport, les cartes de minimum (respectivement maximum) représentent en chaque maille la valeur minimale (respectivement maximale) des 17 simulations climatiques. La simulation représentant la valeur minimale (respectivement maximale) peut être différente d'un point à l'autre. Ainsi ces cartes ne présentent pas les résultats d'une simulation climatique particulière mais les valeurs extrêmes de simulations différentes.

Période de référence, climat récent et climat actuel

Pour ce rapport, la période de référence utilisée est 1976–2005. Il s'agit d'une période de 30 ans du passé récent, qui correspond à la période la plus récente disponible dans les simulations historiques de nos simulations climatiques, issues de la première phase de l'initiative de modélisation climatique régionale EURO-CORDEX. Cette période 1976–2005 correspond également à la période de référence utilisée actuellement dans le portail DRIAS. Les résultats de la réanalyse SAFRAN France (Vidal et al, 2010) constituent la référence observationnelle de l'ensemble des indicateurs décrits dans ce rapport.

Pour autant, cette période de référence, centrée sur 1990, présente des valeurs moyennes et extrêmes assez différentes des valeurs rencontrées ces dernières années, notamment pour les températures. L'écart de la température moyenne annuelle calculé entre la période 2005–2024 (20 années les plus récentes) et la période 1976–2005² est proche de 0,9°C en moyenne sur la France.

La période 2005–2024 sera utilisée dans ce rapport pour qualifier le climat récent. On considère une durée de 20 ans pour être en cohérence avec celle des horizons de la TRACC.

Le climat actuel (ensemble des valeurs climatiques pouvant être rencontrées en 2025) peut être considéré à travers le niveau de réchauffement de la France à +2°C, horizon 2030 de la TRACC, voisin du réchauffement actuellement estimé sur le pays.

Climat futur : différences entre scénarios climatiques et la TRACC

La TRACC propose une approche différente à celle des simulations climatiques du GIEC. Ces simulations s'appuient sur différents scénarios d'émissions de

gaz à effet de serre (**RCP ou SSP**) correspondant à des hypothèses sur les évolutions socio-économiques de nos sociétés. Ces scénarios continus sur le 21^e siècle permettent de faire des projections à différents horizons.

La TRACC s'appuie sur les engagements actuels des Etats en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre et les traduit en termes de réchauffement global et national à trois échéances temporelles.

Ainsi, les horizons 2030, 2050 et 2100 de la TRACC correspondant aux niveaux de réchauffement de +2°C, +2,7°C ou +4°C sur la France, doivent être compris comme des cibles d'adaptation et non des projections pour une période donnée.

Approche statistique et approche narrative

Pour décrire le climat aux différents niveaux de réchauffement de la TRACC, on s'appuie sur un ensemble de 17 simulations climatiques, dénommé TRACC–2023, à la résolution de 8 km sur la France (c'est-à-dire un découpage en près de 9 000 mailles). Les indicateurs climatiques sont calculés en chaque maille et pour chacune des 17 simulations.

L'approche statistique permet d'associer à chaque indicateur une valeur médiane et une plage d'incertitude (enveloppe basse et haute). Elle est présentée dans ce rapport sous forme de valeur minimale et maximale entre crochets. Par exemple, l'écart relatif du cumul annuel de précipitations dans une France à +4°C par rapport à la période de référence 1976–2005 est de +2% en valeur médiane à l'échelle de la France avec une enveloppe allant de -4% pour la valeur minimale à +10% pour la valeur maximale. Ce résultat sera noté par la suite +2% [-4% ; +10%].

Rappel : la prise en compte des incertitudes sur le climat futur est indispensable pour déterminer des stratégies d'adaptation robustes. Une approche des changements attendus en climat futur qui se limiterait à ne considérer que la médiane des évolutions proposées par un ensemble de simulations, présenterait un grand risque de sous-estimation (ou de surestimation) des changements climatiques à venir.

À retenir également : les estimations des incertitudes fournies restent conditionnées à l'ensemble des simulations climatiques et des hypothèses choisies en appui à la TRACC. En dépit des efforts de sélection des simulations climatiques pour leur représentativité des changements attendus sur la France, l'estimation de ces incertitudes fondées sur un ensemble restreint de simulations climatiques est par nature imparfaite, et ne doit pas être analysée de manière totalement probabiliste (Evin et al, 2024). De manière

2. On rappelle que l'écart de température moyenne entre la période 1976–2005 et la période pré-industrielle est de 0,6°C : se reporter à l'encart A de la première partie du rapport TRACC

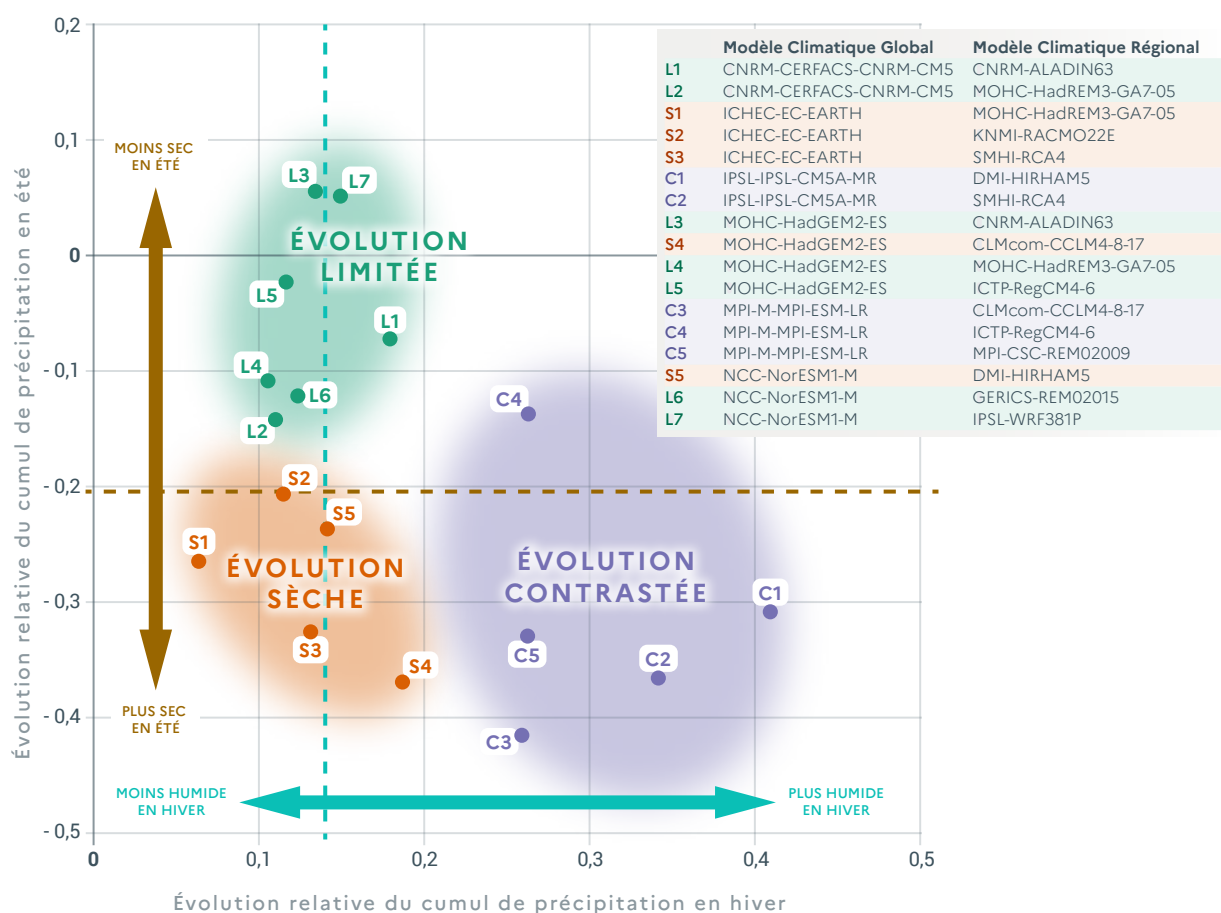


Figure 2 : Évolution du cumul de précipitation en moyenne sur la France en hiver (abscisse) et en été (ordonnée) selon le niveau du réchauffement France hexagonale et Corse à +4 °C (horizon 2100 de la TRACC) à partir d'une classification en trois familles des simulations TRACC-2023. En pointillé turquoise (respectivement marron) les valeurs médianes de l'ensemble TRACC-2023 pour l'évolution relative du cumul de précipitations en hiver (respectivement en été)

générale, il faut considérer que chaque simulation climatique constitue une trajectoire future plausible.

Depuis plusieurs années, l'approche statistique a été complétée par une approche dite « possibiliste » ou par narratifs (ou trames narratives), proposant des récits descriptifs contrastés du climat futur (Shepherd et al, 2018), qui reposent sur des simulations individuelles sélectionnées en fonction de leurs caractéristiques.

Ces narratifs (ou simulations individuelles) sont utiles pour décrire la variabilité interannuelle, mais aussi de possibles futurs événements extrêmes. Ils ont été largement utilisés dans le projet [Explore2](#) pour décrire les [futurs de l'eau en France](#).

La première partie du rapport TRACC a présenté une classification des simulations climatiques fondées sur différentes évolutions des cumuls saisonniers de précipitation (hiver et été). Cette classification est reprise ici (figure 2) en la précisant sur la signification des évolutions proposées :

la famille « évolution sèche », regroupant les simulations numérotées de S1 à S5 présentant une faible augmentation des précipitations en hiver et une forte diminution en été, sera représentée de couleur brique

la famille « évolution limitée », regroupant les simulations numérotées de L1 à L7 présentant une faible augmentation des précipitations en hiver et pas de changement substantiel en été, sera représentée de couleur turquoise

la famille « évolution contrastée », regroupant les simulations numérotées de C1 à C5 présentant une forte augmentation des précipitations en hiver et forte diminution en été, sera représentée de couleur violette

Dans le cadre de ce rapport, nous utiliserons cette approche par famille de narratifs en choisissant des simulations issues de ces trois familles, présentant pour l'aléa climatique étudié des évolutions contrastées sur le pays. Le choix des narratifs tiendra compte également de la capacité des simulations à représenter, de manière conforme aux observations, l'évolution passée des événements extrêmes (vagues de chaleur ou sécheresse par exemple).

Cette approche narrative est illustrative et ne peut se substituer à l'approche statistique considérant l'ensemble des évolutions possibles des variables climatiques.

2. Quelle évolution de la variabilité interannuelle ?

Pour caractériser le climat, on se limite souvent à la valeur moyenne des températures et des précipitations sur une longue période (20 ou 30 ans) ainsi que de quelques valeurs extrêmes (nombre de jours de dépassement de seuil de chaleur ou de pluie). Cependant, ces caractéristiques restent souvent insuffisantes pour qualifier les impacts d'un climat sur les activités humaines et les milieux naturels, sensibles aussi à la variabilité interannuelle, c'est-à-dire aux fluctuations du climat d'une année à l'autre.

Il est rappelé que le climat est intrinsèquement variable (voir encart A). L'étude de la variabilité interannuelle vise à caractériser l'ensemble des valeurs qui pourraient être observées sur une période donnée.

Dans le cadre de la TRACC, on s'appuie sur des périodes de 20 ans autour de l'année d'atteinte des différents niveaux de réchauffement.

Pour caractériser le climat d'une année ou d'une saison, les deux variables climatiques principales sont la température moyenne et le cumul des précipitations. Par la suite, nous considérons aussi ces deux variables de manière concomitante et illustrons leurs variations annuelles et saisonnières futures par comparaison à la période récente (2005–2024).

Cette analyse peut être conduite à la fois selon une approche statistique avec l'ensemble des simulations et à partir de narratifs choisis parmi nos trois familles (évolution sèche, évolution limitée, évolution contrastée).

Quelle évolution de la variabilité interannuelle ?

VARIABILITÉ ANNUELLE DES TEMPÉRATURES

La figure 3 illustre l'évolution attendue de la variabilité des températures moyennes annuelles en France entre la période récente 2005–2024 et la France à +2,7°C et +4°C. Sur la période récente 2005–2024, la moyenne des températures est supérieure de +1°C à celle de la période 1976–2005 tandis qu'une année chaude (10% des années les plus chaudes) atteint +1,7°C et une année froide (10% des années les plus froides) +0,2°C. L'année la plus chaude 2022 dépasse de +2,1°C la moyenne 1976–2005.

En climat futur, il est attendu que la température moyenne annuelle varie autour de sa valeur moyenne de manière au moins équivalente à sa variation sur la période récente (voir encart B).

Cette variabilité combinée aux évolutions climatiques moyennes modifie ainsi la distribution future des tem-

A. Variabilité interannuelle et variabilité interne

Le climat terrestre fluctue naturellement, indépendamment du changement climatique, qui résulte de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre induites par les activités humaines. Ces variations naturelles, regroupées sous le terme de variabilité interne, dépendent des multiples interactions qui se jouent entre les différents compartiments du système Terre et les phénomènes météorologiques (circulation atmosphérique, courants océaniques, banquise...) et sont en partie chaotiques et non prévisibles.

Les conditions météorologiques varient d'une année à l'autre, ce qu'on appelle la variabilité interannuelle. La variabilité interne du climat se manifeste aussi sur des périodes plus longues, pluriannuelles, décennales ou multi-décennales.

La figure A1 ci-contre illustre la variabilité inter-annuelle (d'une année à l'autre) et la variabilité interne (périodes de plusieurs années aux conditions comparables) du cumul annuel de précipitation à l'échelle de la France

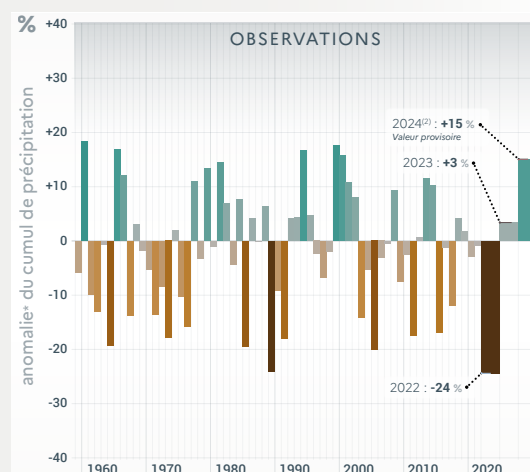


Figure A1 : Anomalie annuelle relative du cumul de précipitation sur la France de 1959 à 2024 (référence 1991–2020) (source bilan climatique Météo-France 2024)

pératures et la probabilité de connaître une année chaude ou fraîche selon nos références actuelles.

Sur la figure 3 (à droite), on voit qu'une année chaude de la période récente (écart de +1,7°C) correspond à une année fraîche dans une France à +2,7°C et que même l'année 2022, correspond à une année ordinaire à cette horizon.

Dans une France à +4°C, les températures moyennes annuelles sont quasiment toutes supérieures à celles connues à ce jour. L'année 2022 est très inférieure à une année fraîche de cette période. Sur cette période, une année chaude correspond à des températures supérieures de près plus de +2°C à celles de 2022.

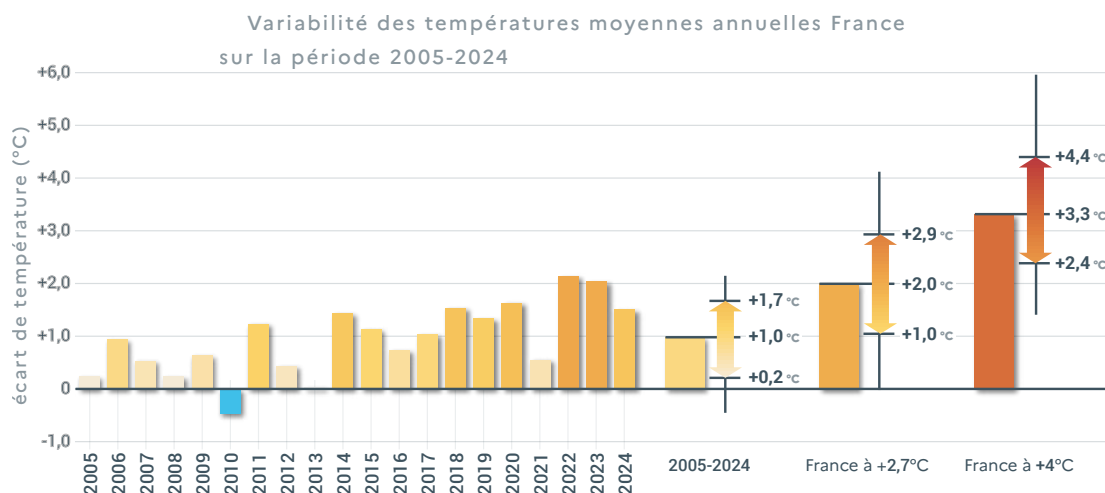


Figure 3 : À gauche, variabilité interannuelle de la température moyenne annuelle sur la période récente 2005–2024 (écart à la moyenne 1976–2005 en °C), à droite, distribution des températures moyennes annuelles dans le climat récent (2005–2024) et dans une France à +2,7°C et +4 °C selon les valeurs moyennes, hautes (10% des valeurs les plus hautes) et basses (10% des valeurs les plus basses) représentées sous forme de flèche et les valeurs extrêmes sous forme de trait fin.

VARIABILITÉ ANNUELLE DES PRÉCIPITATIONS

La figure 4 illustre l'évolution attendue de la variabilité du cumul annuel de précipitation entre la période récente 2005–2024 et la France à +2,7°C et +4 °C.

Sur la période récente, le cumul moyen de précipitation est proche de la référence 1976–2005 (-1%) tandis que qu'une année humide (10% des années les plus humides) présente un excédent de +11% (jusqu'à +15% en 2024) et une année sèche (10% des années les plus sèches) un déficit de -17% (jusqu'à -25 % en 2022).

En climat futur, il est attendu que le cumul annuel de précipitations varie autour de sa valeur moyenne de manière au moins équivalente à leur variation sur la période récente (voir encart B).

Cette variabilité combinée aux évolutions climatiques moyennes modifie ainsi la distribution future des précipitations et la probabilité de connaître une année humide ou sèche selon nos références actuelles.

Sur la figure 4 à droite, on voit que le fort déficit de précipitation de l'année 2022 (proche de -25%) correspond à une année sèche rare (inférieur au quantile 10) dans une France à +2,7°C et +4°C.

Une année aussi humide que 2024 (record sur les 20 dernières années avec une anomalie relative proche de +15%) correspond par contre une année humide assez ordinaire dans une France à +2,7°C et +4°C (inférieur au quantile 90).

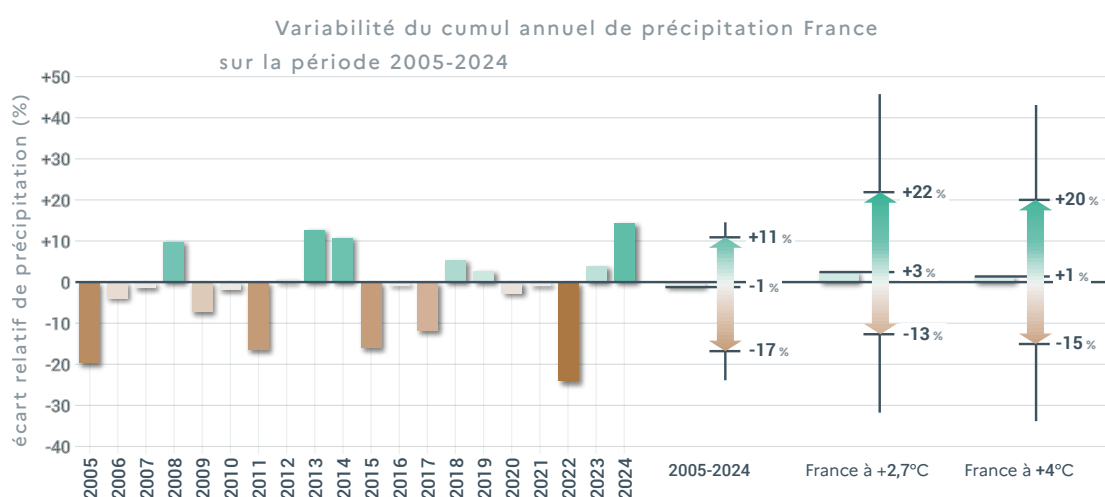


Figure 4 : À gauche, variabilité interannuelle du cumul annuel de précipitations sur la période récente 2005–2024 (écart relatif à la moyenne 1976–2005 en °C), à droite, distribution des températures moyennes annuelles dans le climat récent (2005–2024) et dans une France +2,7°C et +4 °C selon les valeurs moyennes, hautes (10% des valeurs les plus hautes) et basses (10% des valeurs les plus basses), représentées sous forme de flèche et les valeurs extrêmes sous forme de trait fin.

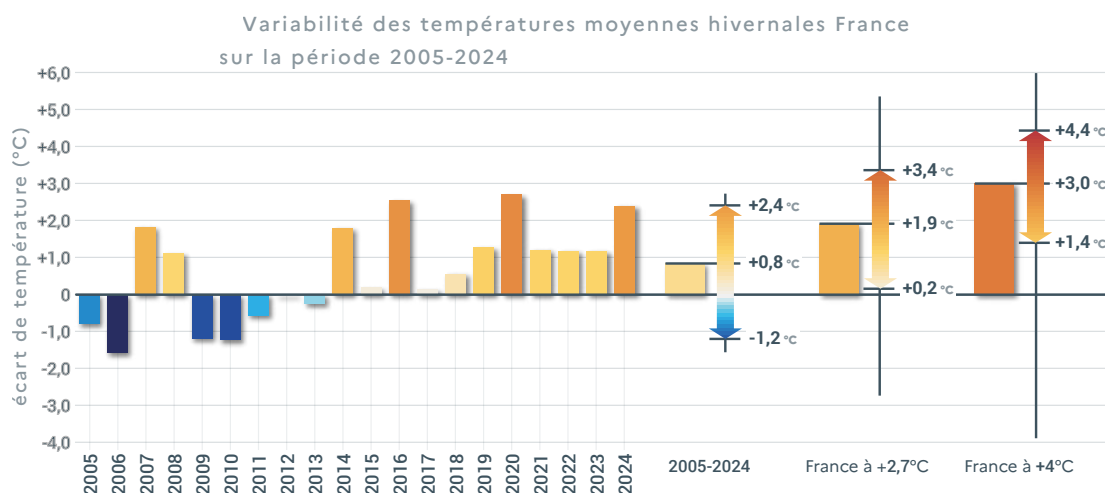


Figure 5 : À gauche, variabilité interannuelle de la température moyenne hivernale sur la période récente 2005–2024 (écart à la moyenne 1976–2005 en °C), à droite, distribution des températures moyennes hivernales dans le climat récent (2005–2024) et dans une France à +2,7°C et +4°C selon les valeurs moyennes, hautes (10% des valeurs les plus hautes) et basses (10% des valeurs les plus basses) représentées sous forme de flèche et les valeurs extrêmes sous forme de trait fin.

Quelle évolution de la variabilité en hiver ?

VARIABILITÉ DES TEMPÉRATURES EN HIVER

La figure 5 illustre l'évolution attendue de la variabilité des températures moyennes hivernales entre la période récente 2005–2024 et la France à +2,7°C et +4°C.

Sur la période récente 2005–2024, la moyenne des températures est supérieure de +0,8°C à celle de la période 1976–2005 tandis qu'un hiver doux (10% des années les plus chaudes) dépasse de +2,4°C la moyenne 1976–2005 et qu'un hiver froid (10% des années les plus froides) est inférieur de -1,2°C la moyenne 1976–2005. L'hiver le plus doux 2020 dépasse de +2,7°C la moyenne 1976–2005.

En climat futur, il est attendu que la température moyenne hivernale varie autour de sa valeur moyenne de manière au moins équivalente à leur variation

sur la période récente (voir encart B). Cette variabilité combinée aux évolutions climatiques moyennes modifie ainsi la distribution future des températures moyennes hivernales et la probabilité de connaître un hiver doux ou froid selon nos références actuelles.

Il apparaît ainsi qu'un hiver moyen de la période récente sera un hiver plutôt froid dans une France à +2,7°C et exceptionnellement froid dans une France à +4°C (inférieur au quantile 10). L'hiver 2020, record actuel de douceur correspond à un hiver doux ordinaire dans une France à +2,7°C (inférieur au quantile 90) et plutôt frais dans une France à +4°C (inférieur à la médiane).

VARIABILITÉ DES PRÉCIPITATIONS EN HIVER

La figure 6 illustre l'évolution attendue de la variabilité du cumul hivernal de précipitation entre la période récente 2005–2024 et la France à +2,7°C et +4°C.

Sur la période récente, le cumul moyen de précipitation est légèrement inférieur à la référence 1976–2005

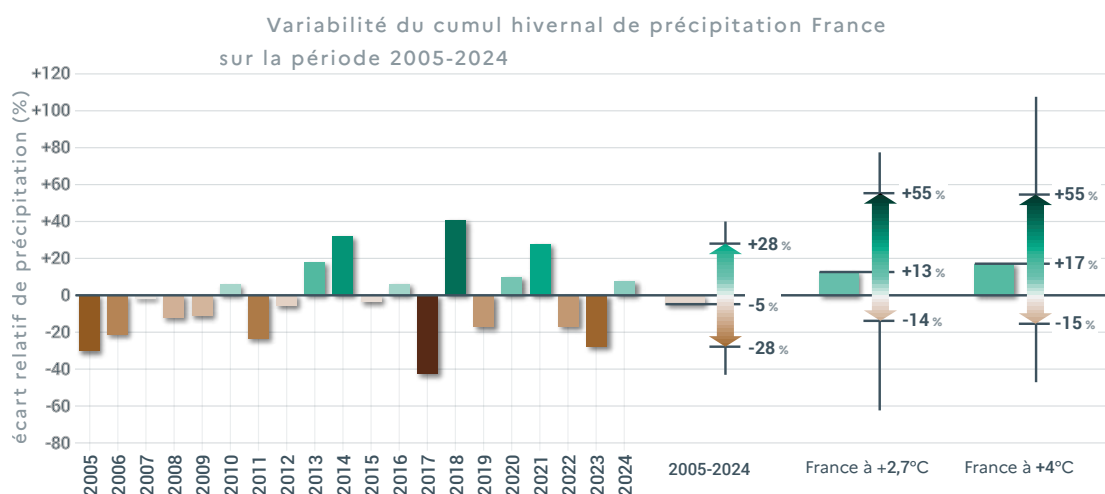


Figure 6 : À gauche, variabilité interannuelle du cumul hivernal de précipitation sur la période récente 2005–2024 (écart à la moyenne 1976–2005 en %), à droite, distribution du cumul hivernal de précipitation dans le climat récent (2005–2024) et dans une France à +2,7°C et +4°C selon les valeurs moyennes, hautes (10% des valeurs les plus hautes) et basses (10% des valeurs les plus basses) représentées sous forme de flèche et les valeurs extrêmes sous forme de trait fin.

(-5%) tandis que qu'une année humide (10% des années les plus humides) présente un excédent de +28% par rapport à la référence 1976–2005 (jusqu'à +40% lors de hiver 2018) et une année sèche (10% des années les plus sèches) un déficit de -28% par rapport à la référence 1976–2005 (déficit rencontré en hiver 2023).

En climat futur, il est attendu que le cumul hivernal de précipitations varient autour de sa valeur moyenne de manière au moins équivalente à leur variation sur la période récente (voir encart B).

Cette variabilité combinée aux évolutions climatiques moyennes modifie ainsi la distribution future des précipitations et la probabilité de connaître un hiver humide ou sec selon nos références actuelles.

il apparaît ainsi qu'un hiver aussi sec que 2023 sera moins probable dans une France à +2,7°C et +4°C mais que les hivers secs n'auront pas disparu. A l'inverse, un hiver aussi humide que 2018 (record sur la période 2005–2024) est un hiver humide ordinaire dans une France à +2,7°C et +4°C (inférieur au quantile 90).

APPROCHE NARRATIVE POUR L'ÉVOLUTION DES HIVERS

En complément de l'approche statistique, on peut aussi décrire l'évolution de la variabilité interannuelle hivernale à partir d'une sélection de narratifs. On considère ici le narratif **S5** de la famille « évolution sèche », le narratif **L5** de la famille « évolution limitée » et le narratif **C3** de la famille « évolution contrastée ».

La figure 7 présente les écarts de la température moyenne annuelle (en abscisse) et les écarts du cumul annuel de précipitation (en ordonnée) par rapport à la référence 1976–2005, pour les horizons 2050 et 2100 de la TRACC (en cercle de couleur) et pour les données observées (2005–2024 – en triangle) :

Avec le narratif **S5**, les précipitations évoluent peu à l'horizon 2050 de la TRACC mais des hivers à la fois très chauds et très humides, au-delà du record pluvieux de 2018, apparaissent à l'horizon 2100 de la TRACC. À noter que de rares hivers relativement froids (proche de la normale 1976–2005) restent possibles même à l'horizon 2100 de la TRACC.

Avec le narratif **L5**, on constate une grande gamme d'hivers possibles avec des hivers très doux et très humides (au-delà des records des années récentes) mais aussi des hivers encore secs, notamment à l'horizon TRACC 2100. Les hivers frais se réduisent mais ne disparaissent pas complètement à l'horizon 2100 de la TRACC.

B. Évolution de la variabilité interannuelle et saisonnière des températures et précipitations en climat futur

Pour mesurer la variabilité des températures ou des précipitations d'une année à l'autre, on considère souvent les écarts de ces valeurs avec leur moyenne, calculée à travers la variance ou l'écart type. On peut l'illustrer par la différence sur une période de 20 ou 30 ans entre les années les plus chaudes et les plus fraîches (respectivement les années les plus sèches ou les plus humides). L'écart type, appelé variabilité par la suite, représente une valeur moyenne de ces différences.

Sur la figure B1, on compare pour la température moyenne et le cumul de précipitation et les trois pas de temps (année, hiver et été), l'évolution de la variabilité entre la période récente 2005–2024 et les trois niveaux de réchauffement de la TRACC à partir de l'ensemble TRACC–2023, représenté à travers la valeur médiane la valeur minimale et maximale des 17 simulations.

Pour les températures moyennes et le cumul de précipitation, aucune tendance claire ne se dégage sur l'évolution de la variabilité tant sur l'année que l'hiver ou l'été.

Il est attendu qu'en climat futur, les températures moyennes et les cumuls de précipitation varient autour de leur valeur moyenne de manière au moins équivalente à leur variation sur la période récente.

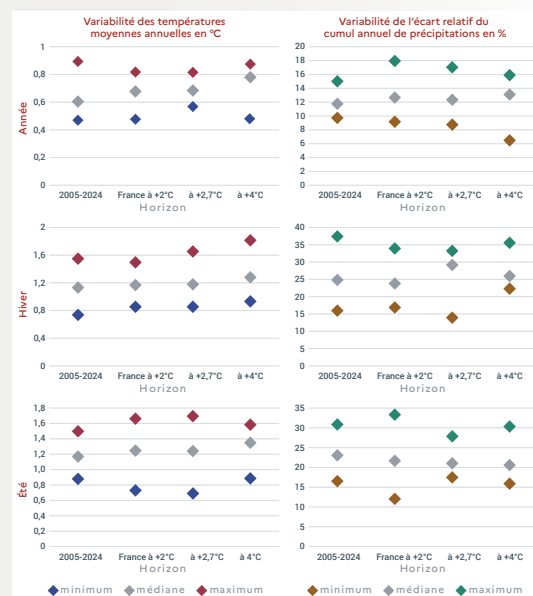


Figure B1 : Évolution de la variabilité (écart type) de température moyenne et cumul de précipitation pour les trois pas de temps (année, hiver et été), entre la période récente 2005–2024 et aux trois niveaux de réchauffement de la TRACC à partir de l'ensemble TRACC–2023, représenté à travers la valeur médiane des 17 simulations en gris, la valeur minimale en bleu pour les températures et marron pour les précipitations et maximale en rouge pour les températures et vert pour les précipitations.

Avec le narratif **C3**, le caractère humide des hivers prédomine (très peu d'années sèches) et les années les plus humides sont très supérieures aux maxima observés dans le climat récent, dès l'horizon 2050 de la TRACC. Les hivers les plus frais correspondent cette fois à nos hivers récents les plus doux.

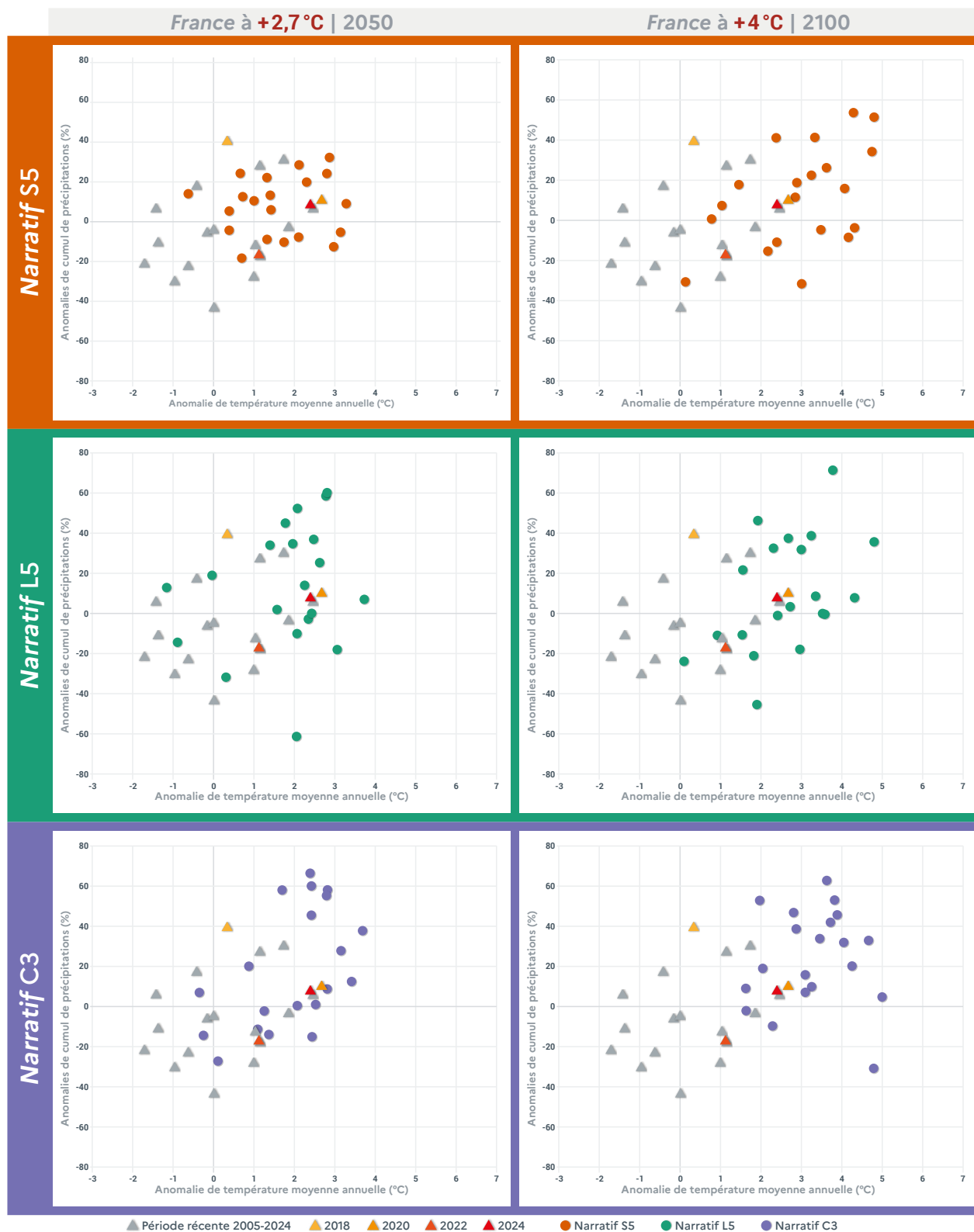


Figure 7 : Évolution de la variabilité interannuelle des narratifs S5, L5, C3, pour l'écart à la moyenne hivernale de température et l'écart relatif du cumul hivernal de précipitation (référence 1976–2005) selon la période récente 2005-2024 sous forme de triangle gris. Les années 2024, 2022, 2020 et 2018 sont représentées respectivement en rouge, orange foncé, orange et jaune. Les niveaux de réchauffement +2,7°C et +4 °C France hexagonale sous forme de ronds de la couleur de la famille concernée en 2050 et 2100.

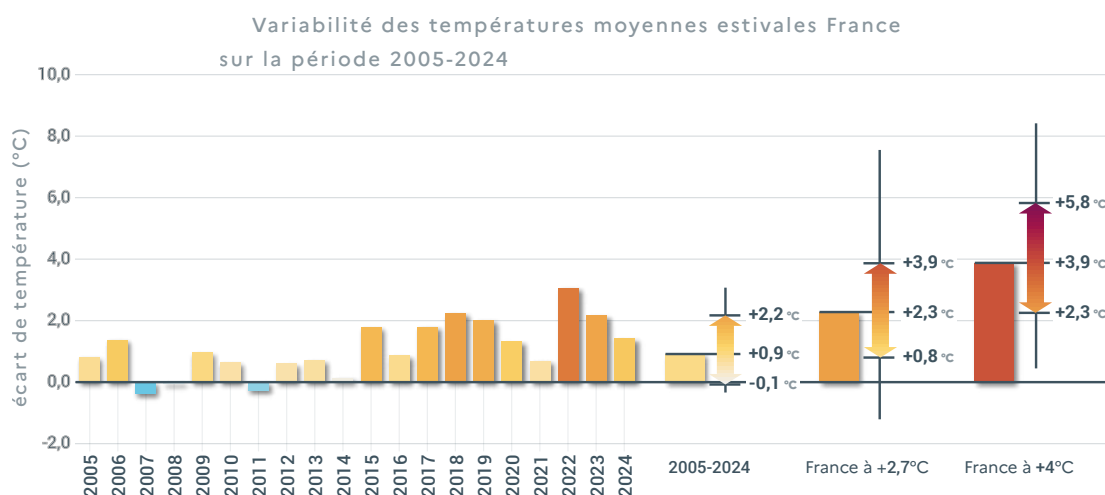


Figure 8 : À gauche, variabilité interannuelle de la température moyenne estivale sur la période récente 2005–2024 (écart à la moyenne 1976–2005 en °C), à droite, distribution des températures moyennes estivales dans le climat récent (2005–2024) et dans une France à +2,7°C et +4°C selon les valeurs moyennes, hautes (10% des valeurs les plus hautes) et basses (10% des valeurs les plus basses) représentées sous forme de flèche et les valeurs extrêmes sous forme de trait fin.

Quelle évolution de la variabilité en été ?

VARIABILITÉ DES TEMPÉRATURES EN ÉTÉ

La figure 8 illustre l'évolution attendue de la variabilité des températures moyennes estivales entre la période récente 2005–2024 et la France à +2,7°C et +4°C.

Sur la période récente 2005–2024, la moyenne des températures est supérieure de +0,9°C à celle de la période 1976–2005 tandis qu'un été chaud (10% des étés les plus chauds) dépasse de +2,2°C la moyenne 1976–2005 et qu'un été frais (10% des étés les plus frais) est inférieur de -0,1°C à la moyenne 1976–2005. L'été 2022 le plus chaud de la période récente dépasse de +3°C la moyenne 1976–2005.

En climat futur, il est attendu que la température moyenne estivale varie autour de sa valeur moyenne de manière au moins équivalente à sa variation sur

la période récente (voir encart B). Cette variabilité combinée aux évolutions climatiques moyennes modifie ainsi la distribution des températures moyennes estivales et la probabilité de connaître un été chaud ou frais selon nos références actuelles.

Il apparaît ainsi qu'un été moyen de la période récente (écart de +0,9°C par rapport à 1976–2005) est un été frais dans une France à +2,7°C et que l'été 2022 correspond à un été plutôt frais dans une France à +4°C alors qu'un été chaud correspond à des températures supérieures de près de 3°C à 2022.

VARIABILITÉ DES PRÉCIPITATIONS EN ÉTÉ

La figure 9 illustre l'évolution attendue de la variabilité du cumul estival de précipitation entre la période récente 2005–2024 et la France à +2,7°C et +4°C.

Sur la période récente, le cumul moyen de précipitation en été est légèrement inférieur à la référence 1976–2005 (-2%) tandis que qu'un été humide (10% des étés les plus humides) présente un excédent de

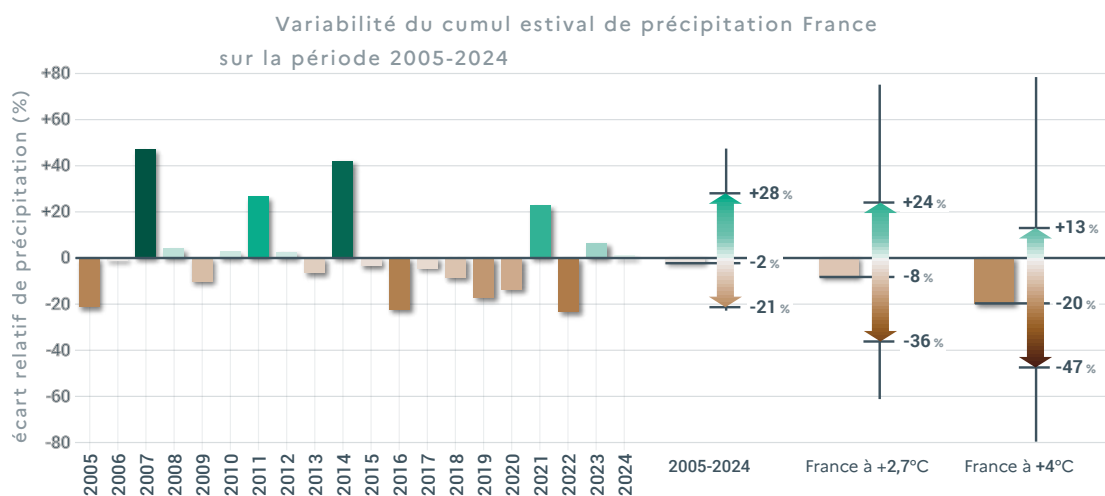


Figure 9 : À gauche, variabilité interannuelle du cumul estival de précipitations sur la période récente 2005–2024 (écart relatif à la moyenne 1976–2005 en %), à droite, distribution du cumul estival de précipitation dans le climat récent (2005–2024) et dans une France à +2,7°C et +4°C selon les valeurs moyennes, hautes (10% des valeurs les plus hautes) et basses (10% des valeurs les plus basses) représentées sous forme de flèche et les valeurs extrêmes sous forme de trait fin.

+28% par rapport à la référence 1976–2005 (excédent de +23% en 2021) et un été sec (10% des années les plus sèches) un déficit de -21% par rapport à la référence 1976–2005, (déficit de -25% en 2022).

En climat futur, il est attendu que le cumul estival de précipitations varie autour de sa valeur moyenne de manière au moins équivalente à leur variation sur la période récente (voir encart B)

Cette variabilité combinée aux évolutions climatiques moyennes modifie ainsi la distribution future des précipitations et la probabilité de connaître un été humide ou sec selon nos références actuelles.

Il apparaît ainsi qu'un été aussi humide que 2021 est encore possible dans une France à +2,7°C mais devient plus rare dans une France à +4°C sans que les étés humides aient disparu. À l'inverse, un été aussi sec que 2022 devient un été ordinaire dans une France à +4°C tandis qu'un été sec correspond à un déficit près de deux fois plus important que 2022.

APPROCHE NARRATIVE POUR L'ÉVOLUTION DES ÉTÉS

En complément de l'approche statistique, on peut aussi décrire l'évolution de la variabilité interannuelle estivale à partir notre sélection de trois narratifs : le narratif **S5** de la famille « évolution sèche », le narratif **L5** de la famille « évolution limitée » et le narratif **C3** de la famille « évolution contrastée ».

La figure 10 présente les écarts du cumul de précipitations moyennes estivales (en abscisse) et les écarts relatifs du cumul estival de précipitations (en ordonnée) par rapport à la référence 1976–2005, pour les horizons 2050 et 2100 de la TRACC (en cercle de couleur) et pour les données observées (2005–2024 – en triangle).

Avec le narratif **S5**, on constate un décalage vers des étés plus chauds et plus secs. Dès l'horizon 2050 de la TRACC, des étés plus chauds et plus secs sont observés mais des étés humides restent possibles. À l'horizon 2100, une forte hausse des températures se combine au déficit systématique de précipitations.

Avec le narratif **L5**, la hausse des températures en été n'est pas forcément toujours associée à des étés plus secs. Aux horizons 2050 et 2100 de la TRACC, on constate une grande variabilité des étés, parfois très secs (au-delà des records actuels) mais aussi parfois assez humides.

Avec le narratif **C3**, l'évolution vers des étés chauds et secs est très marquée. Les étés humides disparaissent quasi totalement dès l'horizon TRACC 2050 et les étés plus secs que les records actuels deviennent la norme à l'horizon TRACC 2100.

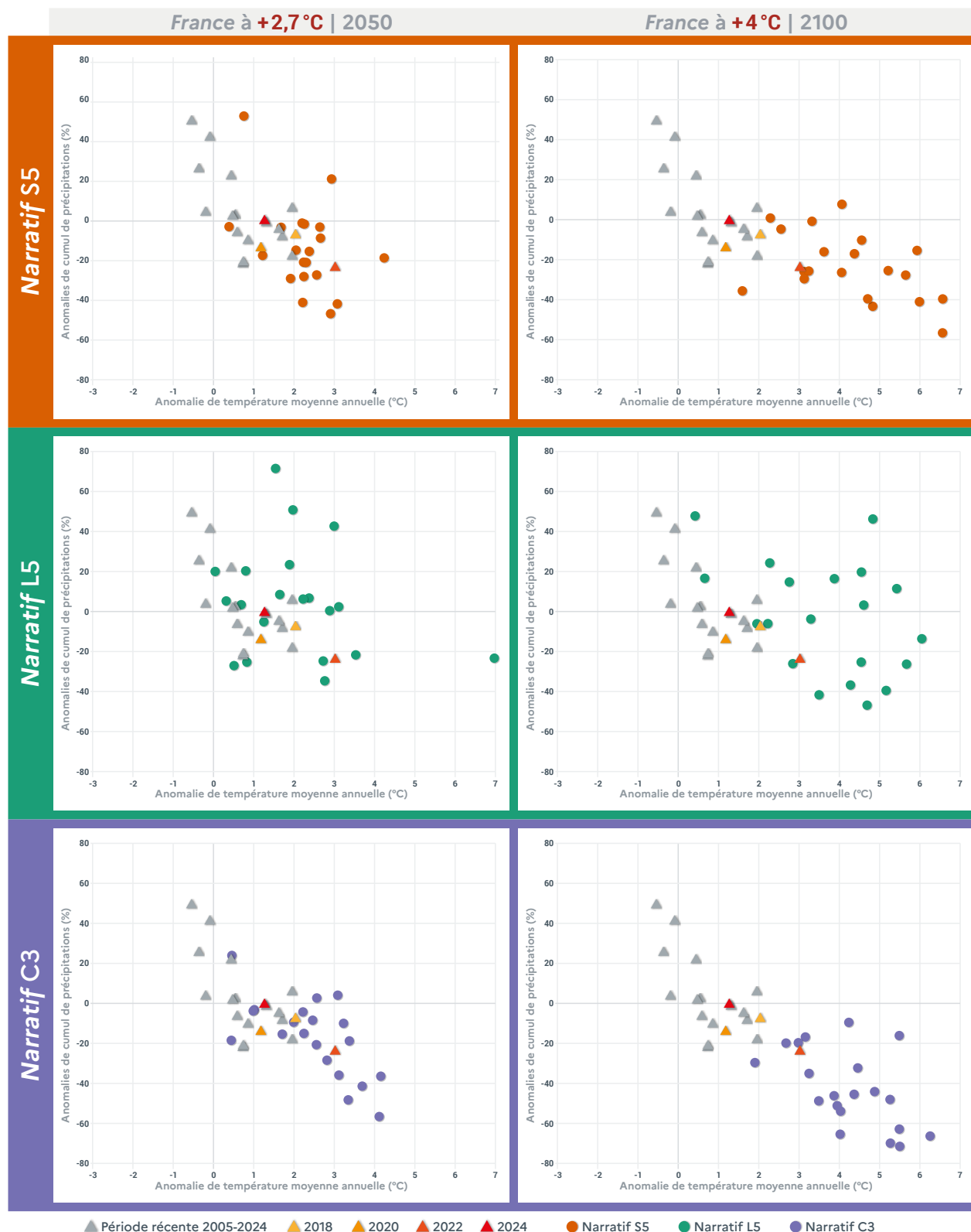


Figure 10 : Évolution de la variabilité interannuelle des narratifs S5, L5 et C3 pour l'écart à la moyenne estivale de température et l'écart relatif du cumul estival de précipitation (référence 1976–2005) selon la période récente 2005-2024 sous forme de triangle gris. Les années 2024, 2022, 2020 et 2018 sont représentées respectivement en rouge, orange foncé, orange et jaune. Les niveaux de réchauffement +2,7°C et +4°C France hexagonale sous forme de ronds de la couleur de la famille concernée en 2050 et 2100.

En résumé pour la variabilité interannuelle

**Pour un niveau de réchauffement France à +4 °C,
horizon 2100 de la TRACC :**

- La variabilité des températures et des précipitations d'une année à l'autre se maintient, voire se renforce aux différents horizons de la TRACC : il est donc indispensable de considérer les écarts possibles des températures et des cumuls de précipitations aux moyennes sur 20 ans tant au niveau annuel que saisonnier.

Les comparaisons se font notamment par rapport à l'année 2022, une année récente ayant connu un fort excédent de température de +2,1 °C par rapport à la référence 1976–2005 et un fort déficit de pluviométrie (de l'ordre de -25 %).

- Une année aussi chaude que 2022 serait une année exceptionnellement fraîche à l'horizon 2100 de la TRACC. Les années les plus chaudes peuvent ainsi dépasser de plus de +2 °C la température moyenne annuelle observée en 2022.
- Pour les précipitations à l'échelle annuelle, les années de faibles précipitations sont globalement comparables aux années connues ces vingt dernières années mais des années plus humides que les records observés à ce jour sont possibles.
- Des hivers frais deviennent progressivement moins probables sans être totalement exclus. Des hivers secs sont encore possibles mais les hivers humides dominent, avec des cumuls qui dépassent largement les records actuels.
- Un été aussi chaud que 2022 devient un été plutôt frais et des étés plus chauds de +2 à +3 °C sont attendus. Les étés humides peuvent encore exister mais les étés secs prédominent et des déficits beaucoup plus importants que ceux observés jusqu'à présent sont attendus.
- L'approche par narratifs met en évidence la possibilité de grande variabilité entre des saisons chaudes et des saisons fraîches, des saisons sèches ou des saisons humides. La possibilité de dépassement des records humides de précipitations en hiver ou des records secs en été sont à considérer dans les démarches d'adaptation.

3. Quelle évolution des extrêmes de température ?

Les extrêmes chauds ou froids ont des impacts importants sur la santé humaine, la biodiversité et de nombreuses activités socio-économiques.

L'évolution des températures extrêmes peut être considérée à travers différents indicateurs relatifs aux températures quotidiennes maximales, minimales, aux nombres de jours de dépassement de seuils ou leur succession (notion d'épisode ou d'événement). Dans ce chapitre, on considère le nombre de jours de très forte chaleur (température maximale supérieure à 35°C), la température maximale de la journée la plus chaude de l'année, le nombre de nuits chaudes (température minimale supérieure à 20°C), les caractéristiques des vagues de chaleur (dont la définition est présentée dans l'encart C). Les extrêmes froids seront aussi considérés à partir du nombre de jours de gel.

On utilisera successivement ici une approche statistique puis une approche fondée sur les narratifs.

Quelle évolution des extrêmes chauds ?

NOMBRE DE JOURS DE TRÈS FORTE CHALEUR

Le nombre de jours de très forte chaleur (température maximale supérieure à 35°C) augmente progressivement du sud au nord de la France et avec les niveaux de réchauffement (*figure 11*).

Le nombre de jours de très forte chaleur à l'échelle France était faible sur la période 1976–2005 (en moyenne 1 année sur 2). Ce nombre atteint 2 jours (entre 1 jour et 5 jours selon les simulations) dans une France à +2°C, 4 jours (entre 1 jour et 6 jours selon les simulations) dans une France à +2,7°C et enfin 8 jours (entre 5 jours et 13 jours selon les simulations) dans une France à +4°C. Dans une France à +4°C, le nombre de jours de très forte chaleur dans la région parisienne est équivalent à celui des régions méditerranéennes dans le climat actuel. Le nombre

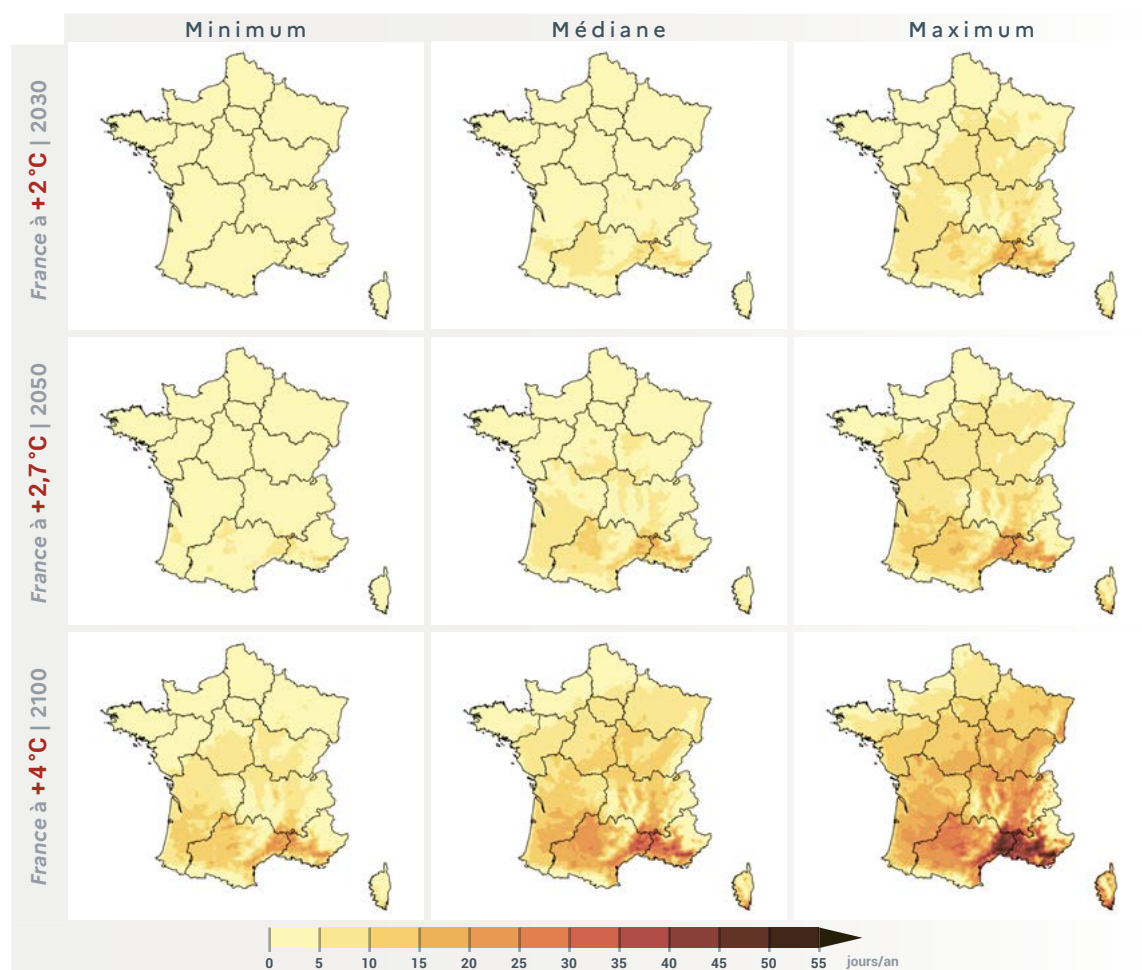


Figure 11 : Évolution du nombre de jours de très forte chaleur (température maximale supérieure ou égale à +35°C) selon les niveaux de réchauffement +2°C, +2,7°C et +4°C en France hexagonale, horizons TRACC 2030, 2050 et 2100, selon les valeurs min, médiane et max de l'ensemble TRACC-2023

de journées de très forte chaleur atteint jusqu'à 30 à 40 jours dans les régions méditerranéennes (soit une dizaine de jours de plus que les pires années connues à ce jour).

Quelques valeurs sur six villes en France

On présente dans le tableau ci-dessous les valeurs médianes de l'ensemble TRACC-2023 pour le nombre moyen de jours très chauds (ainsi que les minimales et maximales entre crochets).

Nombre de jours très chauds	1976-2005	France à +2°C	France à +2,7°C	France à +4°C
Lille	0	1 [0;2]	1 [0;3]	3 [1;6]
Paris	1	2 [1;6]	4 [1;6]	8 [4;13]
Brest	0	0 [0;1]	1 [0;2]	2 [0;3]
Lyon	1	3 [1;6]	4 [1;7]	11 [6;18]
Toulouse	2	6 [3;8]	8 [4;11]	20 [11;23]
Marseille	1	5 [1;12]	8 [3;16]	22 [12;39]

Il est rappelé que les valeurs présentées correspondent aux valeurs moyennes sur 20 ans. Des valeurs beaucoup plus fortes peuvent être observées une année particulière selon les principes de la variabilité interannuelle (cf. chapitre précédent).

JOURNÉE LA PLUS CHAUDE DE L'ANNÉE ET POSSIBLE RECORD SUR 20 ANS

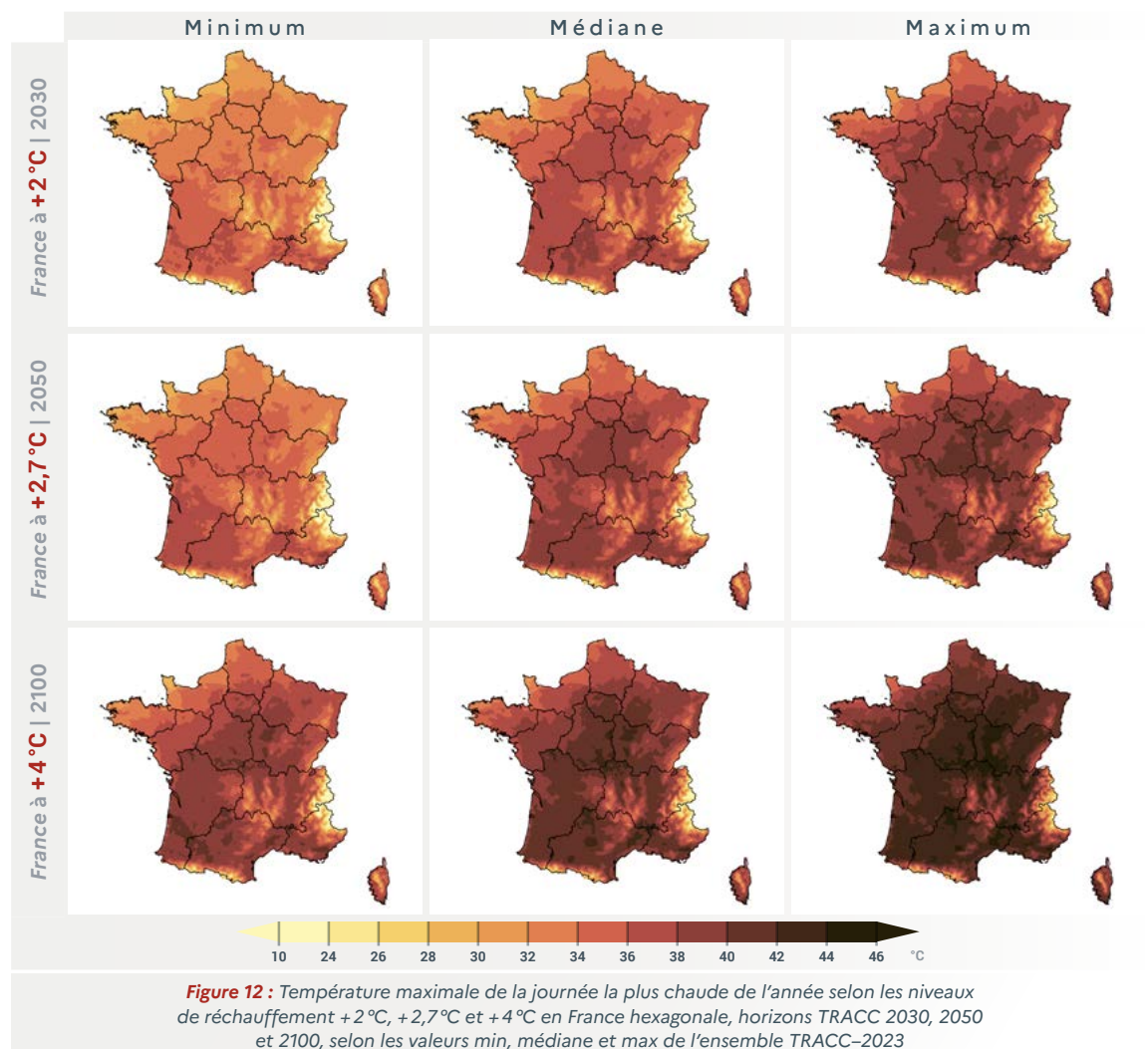
En moyenne sur la période de référence 1976-2005, la température de la journée la plus chaude de l'année à l'échelle France atteignait 33°C.

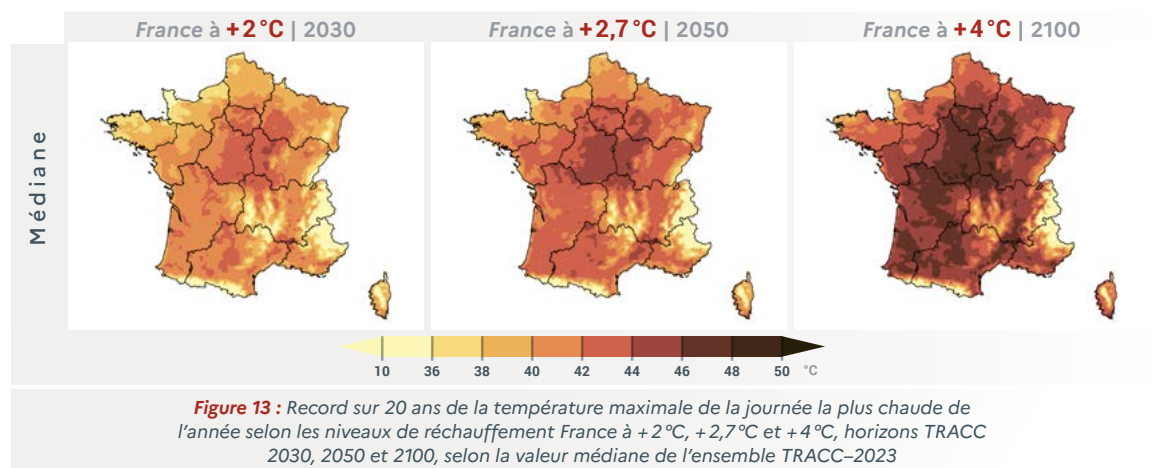
Dans une France à +2°C (figure 12), cette température est de l'ordre de 36°C (entre 33°C et 38°C selon les simulations), de 37°C dans une France à +2,7°C (entre 34°C et 38°C) et approche le seuil des 40°C [38°C ; 42°C] dans une France à +4°C.

Quelques valeurs sur six villes en France

On présente dans le tableau ci-dessous les valeurs médianes de l'ensemble TRACC-2023 pour la moyenne des températures de la journée la plus chaude de l'année (ainsi que les valeurs minimales et maximales entre crochets).

Jour le plus chaud de l'année (°C)	1976-2005	France à +2°C	France à +2,7°C	France à +4°C
Lille	32	33 [31;35]	34 [32;36]	37 [35;40]
Paris	34	36 [34;38]	37 [35;39]	40 [38;42]
Brest	30	31 [30;33]	33 [31;35]	34 [33;37]
Lyon	33	36 [34;38]	37 [34;39]	40 [38;43]
Toulouse	35	38 [36;39]	39 [37;40]	41 [40;43]
Marseille	35	37 [35;38]	38 [36;39]	40 [38;42]





Il est rappelé que les valeurs présentées correspondent aux valeurs moyennes sur 20 ans. Des valeurs beaucoup plus fortes peuvent être observées une année particulière selon les principes de la variabilité (cf. chapitre précédent).

De nombreuses applications ont également besoin de connaître les valeurs record de température pouvant être atteint selon les niveaux de réchauffement de la TRACC. Pour cela, on s'appuie ici sur les valeurs maximales sur 20 ans simulées sur la France dans notre ensemble TRACC-2023.

Sur la *figure 13* présentant la valeur médiane de l'ensemble TRACC 2023, les records de chaleur sur l'ensemble de la France atteignent de l'ordre de 47°C dans une France à +2°C, 48°C dans une France à +2,7°C où le seuil des 50°C devient possible (valeur dépassée dans plus de 20% des simulations). Dans une France à +4°C, des records de chaleur de 50°C deviennent probables : ce seuil est atteint ou dépassé dans près de 80% des simulations.

On note que l'atteinte de ces valeurs extrêmes peut concerner plusieurs régions sur le centre, le centre est et le sud du pays, y compris la région Parisienne.

La quantification de l'estimation des valeurs maximales pouvant être atteintes à un endroit donné (notion de durée de retour) nécessite d'utiliser des lois statistiques selon la théorie des valeurs extrêmes. Les données citées ci-dessus pourront être précisées dans des études dédiées ultérieures.

NOMBRE DE NUITS CHAUDES

Le nombre de nuits chaudes (température minimale supérieure à 20°C) augmente progressivement du sud au nord de la France et avec les niveaux de réchauffement (*figure 14*).

Sur la période de référence 1976–2005, on n'observait à l'échelle de la France que 2 nuits chaudes par an. Ce nombre atteint 7 nuits (entre 4 et 12 nuits selon les simulations) dans une France à +2°C, 12 nuits (entre 6 et 17 nuits) dans une France à +2,7°C et 24 nuits (entre 18 et 29 nuits) dans une France à +4°C. Dans une France à +4°C, le nombre de nuits chaudes dans la région parisienne (30 à 40 nuits) est

équivalent au total observé sur la période 1976–2005 sur les régions méditerranéennes. Sur le littoral méditerranéen, on atteint jusqu'à 100 à 120 nuits chaudes en moyenne par an.

Quelques valeurs sur six villes en France

On présente dans le tableau ci-dessous les valeurs médianes de l'ensemble TRACC-2023 pour le nombre moyen de nuits chaudes (ainsi que les valeurs minimales et maximales entre crochets).

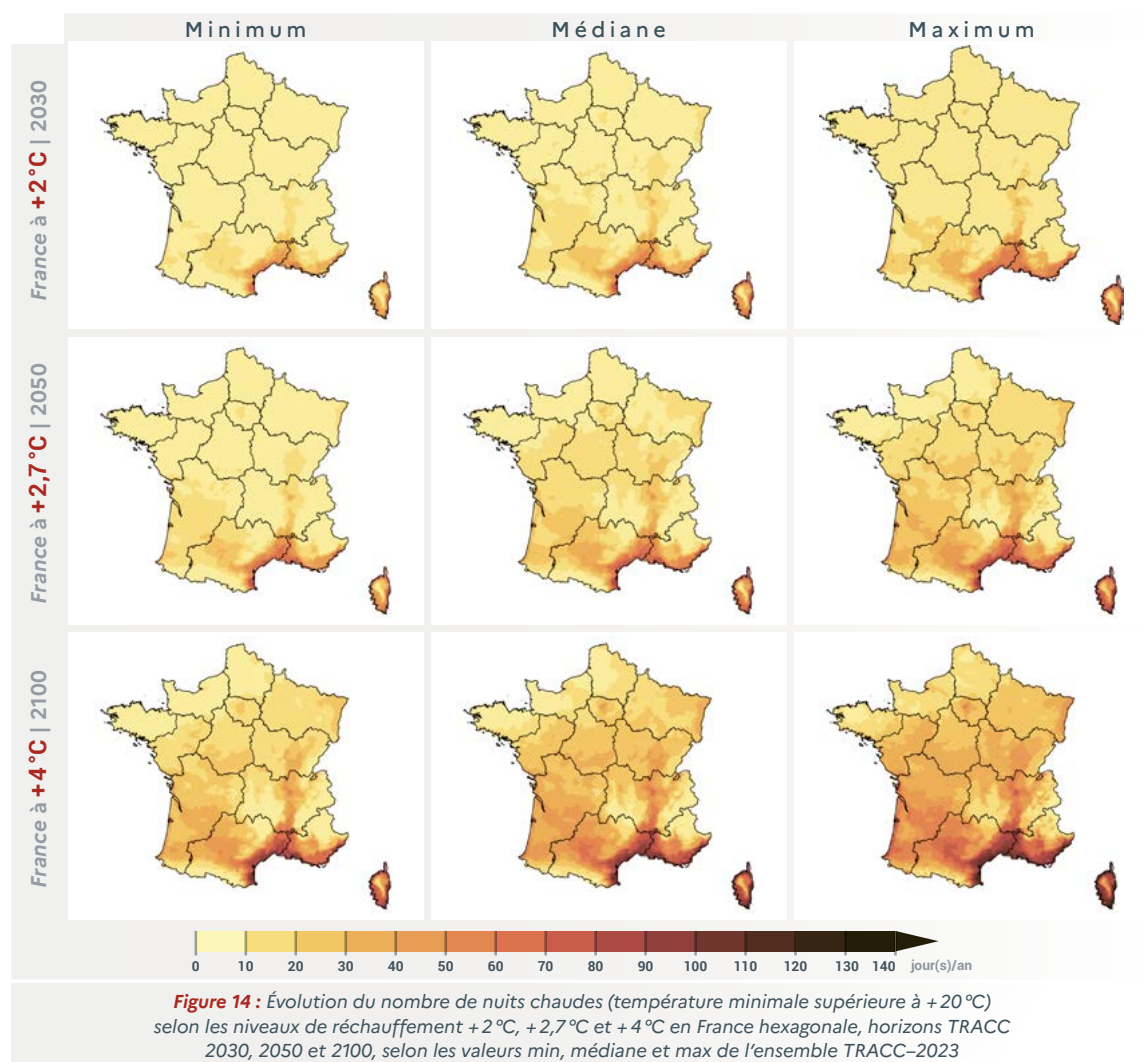
Nombre de nuits chaudes	1976–2005	France à +2°C	France à +2,7°C	France à +4°C
Lille	1	3 [1;6]	6 [3;10]	13 [8;17]
Paris	8	17 [10;23]	26 [19;31]	43 [28;52]
Brest	0	1 [0;2]	3 [1;4]	7 [3;11]
Lyon	6	18 [11;23]	27 [15;33]	45 [37;51]
Toulouse	8	23 [16;30]	33 [25;41]	58 [45;67]
Marseille	29	54 [45;62]	67 [59;73]	88 [82;96]

Il est rappelé que les valeurs présentées correspondent aux valeurs moyennes sur 20 ans. Des valeurs beaucoup plus fortes peuvent être observées une année particulière selon les principes de la variabilité (cf. chapitre précédent).

VAGUES DE CHALEUR

Il n'existe pas de définition universelle des vagues de chaleur. À Météo-France, on utilise principalement une méthode événementielle (*voir encart C*) fondée sur des paramètres de distributions statistiques de la température moyenne quotidienne, permettant de déterminer les dates de début et de fin d'un événement de vague de chaleur, son intensité (température moyenne quotidienne la plus élevée de l'épisode) et sa sévérité (somme des températures moyennes quotidiennes au-dessus du seuil).

À partir de ces critères définis sur la période de référence 1976–2005, on peut ainsi analyser le futur des vagues de chaleur selon les trois niveaux de réchauffement de la TRACC.



C. Comment caractériser les vagues de chaleur ?

Une vague de chaleur est définie par l'Organisation Météorologique Mondiale comme une période de chaleur inhabituelle et persistante pendant un certain nombre de jours et de nuits. Cependant, il n'existe pas de consensus dans la littérature sur une définition unique et des seuils permettant de caractériser un épisode de vague de chaleur. Le choix de la méthodologie dépend principalement du contexte dans lequel l'étude est réalisée et des objectifs d'analyse (étude climatique, système d'alerte et santé humaine, gestion de la demande énergétique, impacts sur les transports, agriculture, etc.).

Dans ce rapport, les seuils définis à l'échelle de la France hexagonale pour les études climatiques à Météo-France ont été choisis pour la détection des vagues de chaleur. Cette approche utilise des seuils en quantile, ce qui permet de l'appliquer à différentes régions et/ou à des contextes climatiques et géographiques variés. La méthode est fondée sur des dépassements de seuils appliqués sur une longue série temporelle de températures moyennes journalières nommée Tmoy (calculée comme la moyenne des températures minimales et maximales, Figure C1).

Trois quantiles différents sont utilisés pour définir les valeurs seuils sur la période historique, considérée comme période de référence. Un épisode de vague de chaleur est identifié lorsque la Tmoy dépasse la valeur du quantile 99,5 (seuil 1). L'événement se prolonge avant et après le pic de chaleur tant que la Tmoy

ne tombe pas durablement (c'est-à-dire plus de deux jours consécutifs) en dessous de la valeur du quantile 97,5 (seuil 2) et ne tombe pas, même occasionnellement, en dessous de la valeur du quantile 95 (seuil 3). Lorsque la durée de la vague de chaleur est au minimum de 3 jours, alors l'épisode est comptabilisé comme tel et décrit par trois paramètres principaux : sa durée (en jours), son intensité maximale (pic de la Tmoy atteint pendant l'événement, en °C) et sa sévérité, calculée comme le nombre cumulé de degrés au-dessus du seuil 2 pendant la durée de l'événement (en °C).

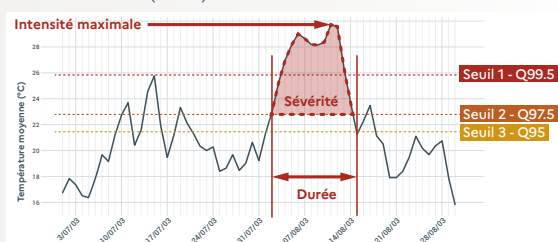


Figure C1 : Évolution de la température moyenne de l'été 2003 sur la région parisienne et caractérisation de la vague de l'été du 2 au 15 août par application de la méthode d'identification des vagues de chaleur

Évolution du nombre de jours de vagues de chaleur

On présente d'abord sur la *figure 15* l'évolution relative du nombre de jours de vagues de chaleur à l'échelle régionale par rapport à la période de référence 1976–2005.

Le nombre de jours de vagues de chaleur est multiplié par un facteur 3 (entre 2 et 5 selon les simulations) dans une France à +2°C par rapport la période de référence 1976–2005, par un facteur 5 (entre 4 et 7 selon les simulations) dans une France à +2,7°C (horizon 2050 de la TRACC) et par un facteur 10 (entre 7 et 12 selon les simulations) dans une France à +4°C (horizon 2100 de la TRACC).

Les évolutions les plus fortes se situent dans le sud du pays mais aucune région française n'échappe à cette multiplication des vagues de chaleur.

Calendrier des vagues de chaleur

Un autre élément important de l'impact des vagues de chaleur est leur période d'occurrence au cours de l'année (voir *figure 16*).

Sur la période de référence, les vagues de chaleur se produisaient de fin juin à fin août. Dans une France à +2°C, la période d'occurrence gagne une quinzaine de jours en juin et en septembre.

Dans une France à +2,7°C, les vagues de chaleur peuvent se produire à partir de début juin et durer jusqu'à mi-septembre.

Dans une France à +4°C, elles peuvent apparaître dès la mi-mai et s'étendre jusqu'à fin septembre.

La probabilité d'être en vague de chaleur augmente fortement au cœur de l'été passant de 10% (1 chance sur 10) sur la période 1976–2005, à 30% dans une France à +2°C, 45% dans une France à +2,7°C et près de 70% dans une France à +4°C. Les fréquences d'occurrence d'une vague de chaleur mi-juin ou début septembre deviennent analogues à ce qu'elles étaient au cœur de l'été sur la période 1976–2005.

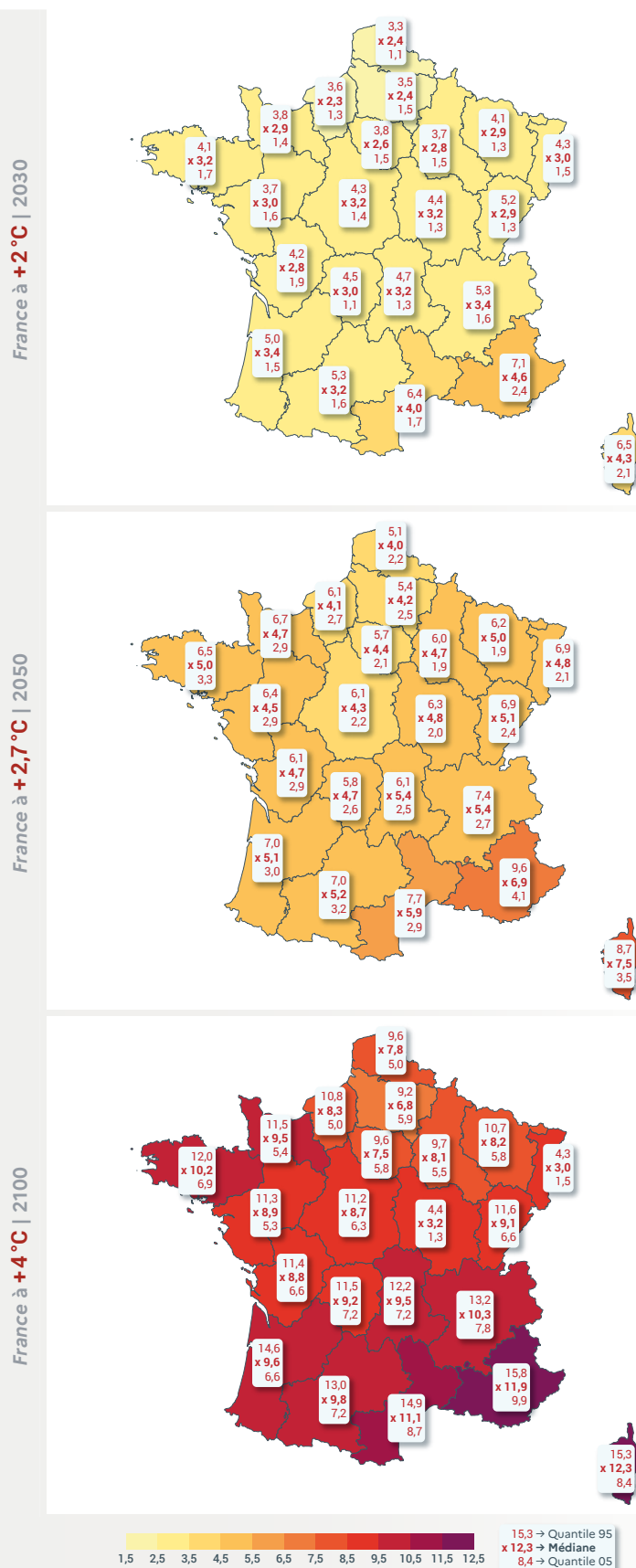


Figure 15 : Évolution du nombre de jours de vagues de chaleur à l'échelle régionale (ratio par rapport à la période de référence 1976–2005) pour les trois niveaux de réchauffement France à +2°C, +2,7°C et +4°C en France hexagonale, horizons TRACC 2030, 2050 et 2100, selon les quantiles 5, médiane et 95 de l'ensemble TRACC-2023.

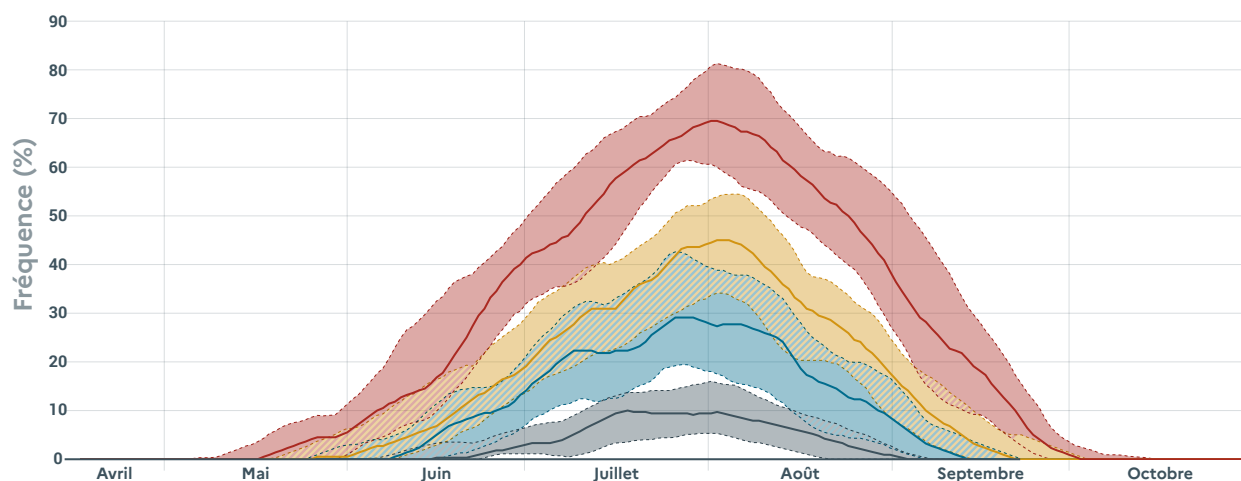


Figure 16 : Fréquence d'occurrence des vagues de chaleur à l'échelle nationale selon les différentes périodes de l'année pour la période de référence 1976-2005 et les trois niveaux de réchauffement France à +2°C (enveloppe bleue), +2,7°C (enveloppe jaune) et +4°C (enveloppe rouge), horizons TRACC 2030, 2050 et 2100, selon les quantiles 17, médiane et 83 de l'ensemble TRACC-2023.

Approche narrative pour les vagues de chaleur

On présente sur la figure 17 le recensement des vagues de chaleur à l'échelle nationale sur la période de référence et pour les niveaux de réchauffement +2,7°C et +4°C de la France pour trois narratifs contrastés, le narratif **S3** de la famille « évolution sèche », le narratif **L2** de la famille « évolution limitée » et **C3** de la famille « évolution contrastée » (voir figure 2 pour le nom des simulations).

Le choix de ces narratifs tient compte de la capacité de ces simulations à représenter de manière conforme aux observations l'évolution passée des vagues de chaleur et des résultats contrastés aux horizons de la TRACC. De manière générale, l'évolution des vagues de chaleur est attendue la plus forte dans les familles « évolutions sèches » et « évolution contrastée » du fait du lien entre sécheresse et forte chaleur en été.

Avec le narratif **S3**, les événements les plus longs dans une France à +2,7°C dépassent les 30 jours contre environ 15 jours sur la période de référence, puis 60 jours dans une France à +4°C. L'intensité maximale (température moyenne de la journée la plus chaude de l'épisode) augmente d'environ 3°C dans une France à +2,7°C par rapport à la référence 1976-2005 et d'environ 6°C dans une France à +4°C.

Avec le narratif **L2**, les événements sont légèrement moins nombreux qu'avec le narratif **S3**, moins intenses et moins longs (plutôt 50 jours) notamment dans une France à +4°C.

Avec le narratif **C3**, les événements sont aussi longs qu'avec le narratif **S3** mais moins intenses au niveau de réchauffement +4°C.

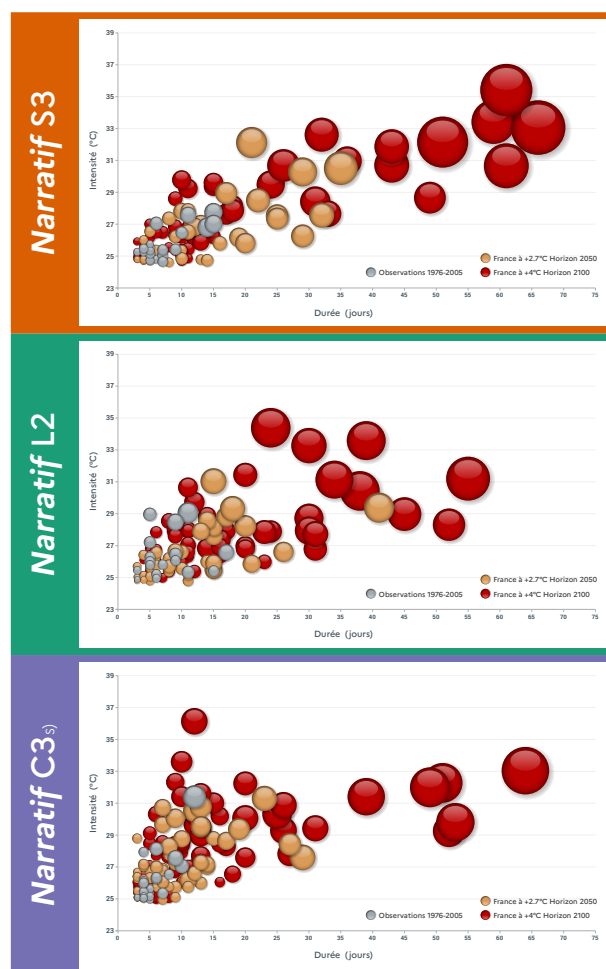


Figure 17 : Évolution des événements de vagues de chaleur pour la période de référence 1976-2005 et les deux niveaux de réchauffement France à +2,7°C et +4°C, horizons TRACC 2050 et 2100 pour les trois narratifs **S3**, **L2** et **C3**. Chaque bulle correspond à une vague de chaleur dont la couleur indique la période d'occurrence (grise sur la période de référence, orange dans une France à +2,7°C et rouge dans une France à +4°C), l'abscisse correspond à sa durée en jour, l'ordonnée, son intensité en °C tandis que la taille indique sa sévérité en °C (selon définition dans l'encart C)

Évolution des extrêmes froids

Avec le réchauffement du climat, les événements froids deviennent de plus en plus rares, sans pour autant que leurs impacts ne diminuent forcément, dans une société et des milieux naturels moins accoutumés et ainsi plus sensibles.

Sur la période de référence 1976–2005, le nombre moyen de jours de gel à l'échelle de la France était de 43 jours.

Ce nombre se réduit à 29 jours (entre 27 et 33 jours selon les simulations) avec un niveau de réchauffement de +2°C, à 23 jours (entre 19 et 27 jours) avec le niveau +2,7°C puis seulement à 16 jours (entre 10 et 24 jours) avec le niveau de réchauffement de +4°C. Le phénomène de gel devient alors rare dans l'ensemble des régions littorales ainsi que les plaines du Sud-Ouest (moins de 10 jours par an en moyenne).

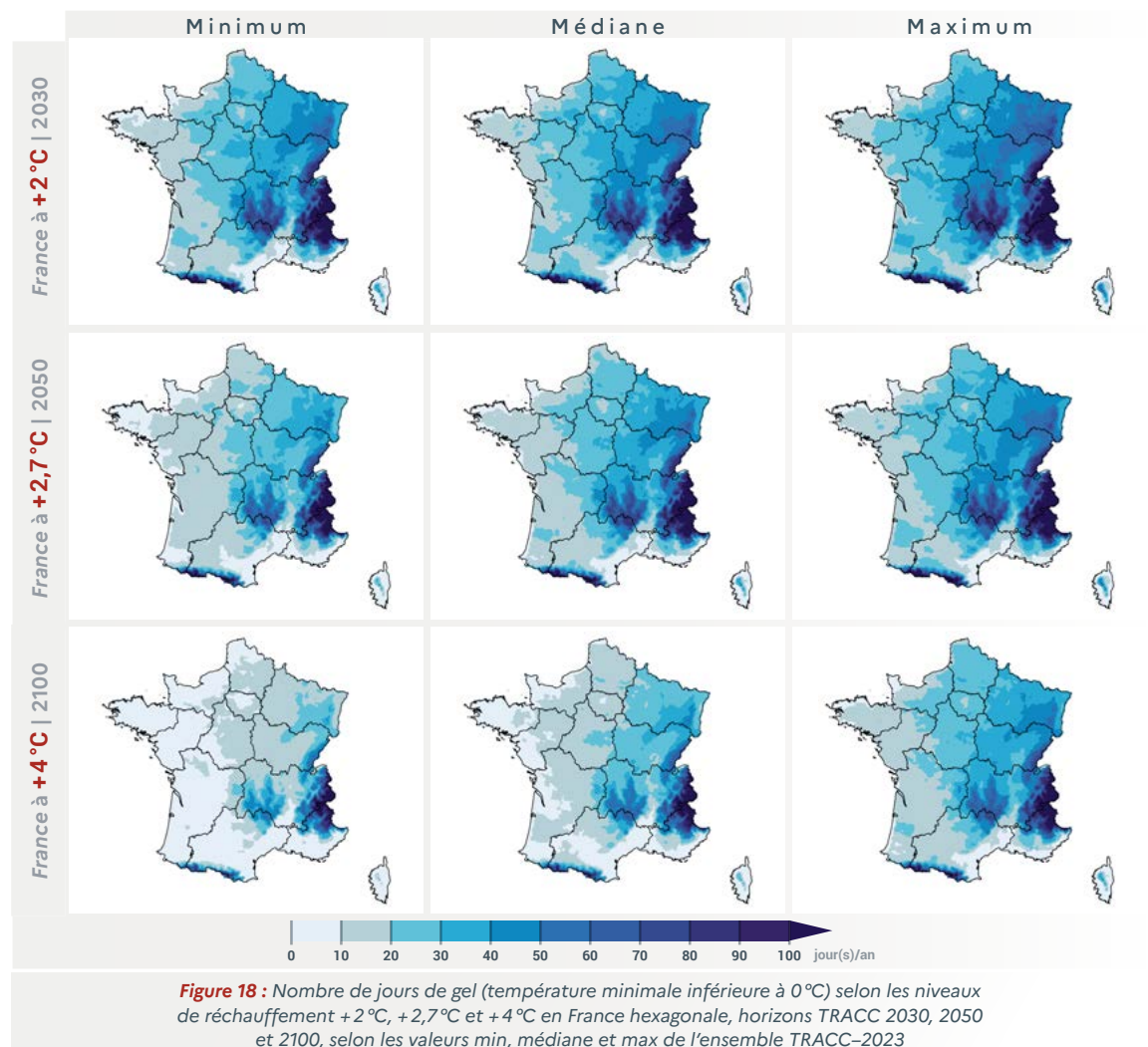
Pour autant, il faut garder en mémoire que ces événements de gel pourront avoir un fort impact sur la végétation et les productions agricoles car ils pourront se produire à des stades végétatifs plus avancés, à l'image du gel tardif connu en France au printemps 2021 (Vautard et al, 2022).

Quelques valeurs sur six villes

On présente dans le tableau ci-dessous les valeurs médianes de l'ensemble TRACC–2023 pour le nombre moyen de jours de gel (ainsi que les valeurs minimales et maximales entre crochets).

Nombre de jours de gel	1976–2005	France à +2°C	France à +2,7°C	France à +4°C
Lille	39	25 [23;28]	21 [15;25]	13 [9;24]
Paris	21	13 [10;15]	10 [6;13]	7 [3;13]
Brest	12	7 [4;9]	6 [3;7]	3 [1;6]
Lyon	55	38 [34;43]	32 [25;37]	22 [16;30]
Toulouse	30	19 [15;21]	14 [11;17]	9 [5;13]
Marseille	20	10 [8;13]	7 [6;10]	3 [2;7]

Il est rappelé que les valeurs présentées correspondent aux valeurs moyennes sur 20 ans. Des valeurs beaucoup plus fortes (respectivement plus faibles) peuvent être observées une année particulière selon les principes de la variabilité (cf. chapitre précédent).



En résumé pour les extrêmes de température

Pour un niveau de réchauffement France à +4°C :

- La hausse des extrêmes chauds est un enjeu majeur pour de nombreux secteurs en matière d'adaptation
- Le nombre annuel de jours de très forte chaleur (température maximale dépassant 35 °C) atteint 8 jours à l'échelle de la France contre moins de 1 jour sur la période de référence. Dans les régions méditerranéennes, on attend en moyenne jusqu'à 30 à 40 jours de très forte chaleur par an (soit une dizaine de jours supplémentaires par rapport aux records de l'été 2022).
- Le nombre annuel de nuits chaudes (plus de 20 °C) approche les 25 jours en moyenne sur la France contre seulement 2 jours sur la période de référence. Sur le littoral méditerranéen, on attend en moyenne jusqu'à 100 à 120 nuits chaudes par an (soit près de 20 à 40 nuits supplémentaires par rapport aux records de l'été 2022)
- Alors qu'il était extrêmement rare au 20^e siècle en France, le seuil des 40 °C est atteint en moyenne tous les ans et localement des records de chaleur jusqu'à 50 °C sont possibles dès l'horizon 2050 de la TRACC et deviennent probables dans les événements caniculaires les plus intenses à l'horizon 2100 de la TRACC.
- Le nombre de jours de vagues de chaleur est multiplié par 7 à 12 par rapport au climat des années 90 et encore par 3 par rapport au niveau de réchauffement France à +2 °C correspondant au climat actuel. Les vagues de chaleur se produisent de mi-mai à fin septembre et peuvent durer jusqu'à 2 mois en continu.
- À l'inverse, le nombre de jours de gel se réduit à une quinzaine de jours en moyenne sur la France contre 43 jours sur la période de référence. Dans les régions littorales et le sud du pays, les gelées deviennent rares (quelques jours par an) mais sont toujours susceptibles de causer des impacts importants si elles se produisent à des stades végétatifs plus avancés.

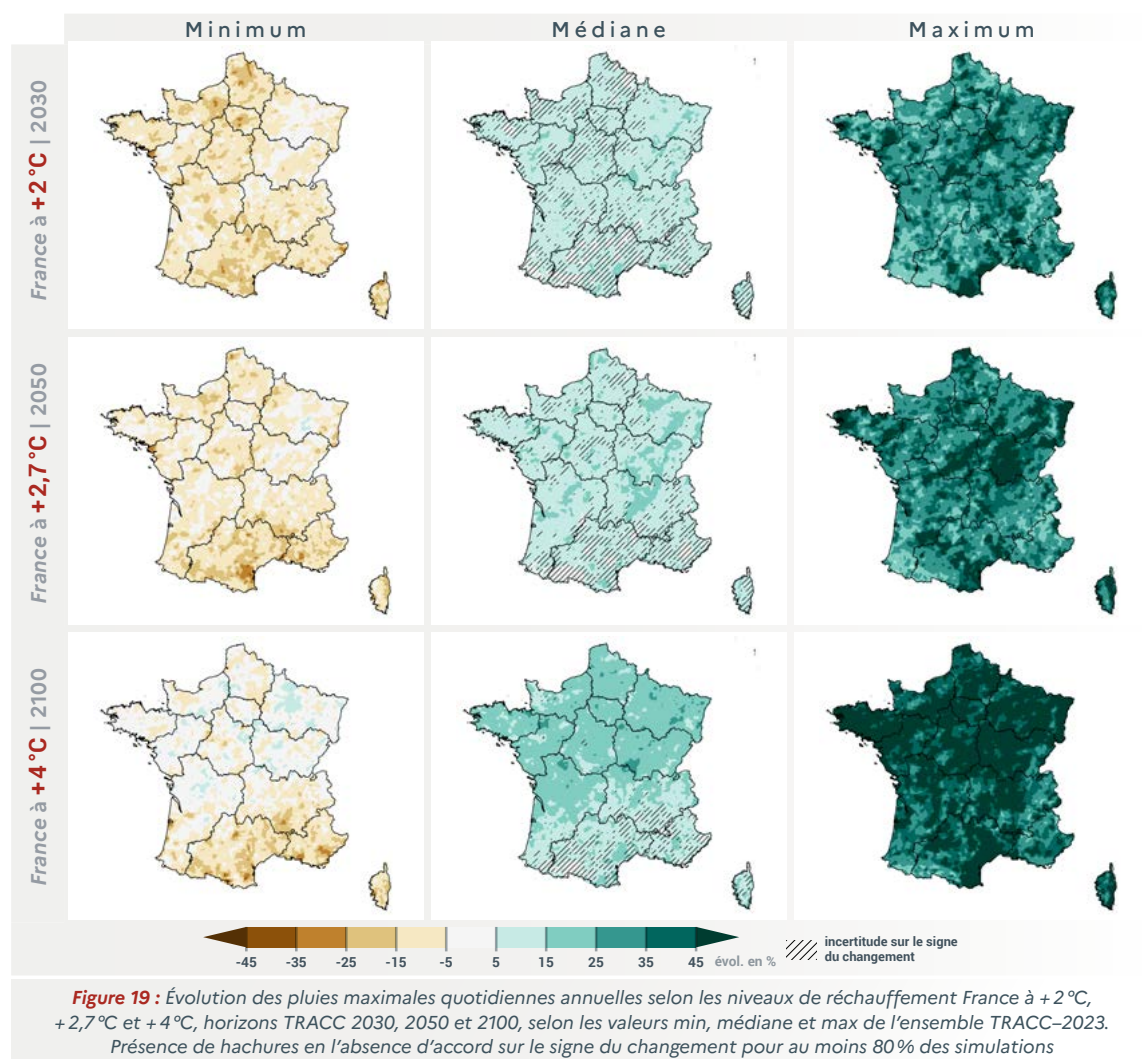
4. Quelle évolution des pluies intenses ?

L'évolution des pluies intenses peut avoir des conséquences importantes sur les risques d'inondation par ruissellement et concerne de nombreux secteurs comme l'urbanisme, les transports ou l'agriculture via l'érosion des sols.

Au-delà de l'augmentation des températures et notamment des extrêmes chauds, le changement climatique renforce globalement les pluies intenses. À l'échelle planétaire, on s'attend à une hausse de ces phénomènes de l'ordre de +7% par degré supplémentaire de réchauffement (source GIEC, 2021).

La figure 19 présente l'évolution de la pluie quotidienne maximale annuelle, c'est-à-dire du cumul de pluie de la journée la plus pluvieuse de l'année, selon les trois niveaux de la TRACC :

- Dans une France à +2°C, la hausse de la pluie quotidienne maximale annuelle est de l'ordre de +9% (entre +6% et +14% selon les simulations) à l'échelle de la France. On note une incertitude sur l'orientation du changement avec moins de 80% des simulations qui projettent un changement à la hausse.
- Dans une France à +2,7°C, la hausse de la pluie quotidienne maximale annuelle est de l'ordre de +11% (entre +4% et +14% selon les simulations) à l'échelle de la France. L'incertitude quant à l'orientation du changement persiste notamment sur la moitié sud du pays (où moins de 80% des simulations projettent un changement à la hausse).



● Dans une France à +4°C, la hausse de la pluie quotidienne maximale annuelle est de l'ordre de +15% (entre +10% et +30% selon les simulations) à l'échelle de la France. L'incertitude quant à l'orientation du changement diminue fortement et ne concerne plus que certaines parties des régions Occitanie, Provence Alpes Côte d'Azur, Corse et le sud de Auvergne Rhône Alpes (avec moins de 80% des simulations qui projettent un changement à la hausse). Les hausses les plus fortes sont observées sur la moitié nord du pays avec des valeurs de l'ordre de +20% dans la moyenne des simulations et au-delà de +30% dans certaines. Quelques simulations renforcent aussi fortement les précipitations intenses sur les régions méditerranéennes.

La connaissance de l'évolution des précipitations intenses au pas de temps infra quotidien et notamment horaire n'est pas accessible avec les modèles climatiques utilisés ici, qui ne représentent pas directement la convection. De tels résultats seront toutefois prochainement disponibles à partir de simulations dites CPM (Convection Permitting Models) intégrant une représentation de la convection (Cailaud et al, 2022).

En résumé pour les pluies intenses

Pour un niveau de réchauffement France à +4°C :

- Les pluies quotidiennes maximales annuelles augmentent sur l'ensemble du pays, de l'ordre de 15% en général et jusqu'à +30% dans certaines simulations.
- Les augmentations les plus fortes sont attendues sur la moitié nord, atteignant +20% en général et beaucoup plus dans certaines simulations. Certaines simulations renforcent aussi les précipitations intenses sur les régions méditerranéennes.
- Ces évolutions sensibles peuvent concerner l'ensemble des événements pluvieux rencontrés sur le territoire comme les pluies d'hiver sur le nord de la France ou les événements cévenols sur les régions méditerranéennes.
- Des travaux complémentaires sont nécessaires pour caractériser l'évolution des pluies convectives intenses sur quelques heures.

5. Quelle évolution de la **ressource en eau et la sécheresse du sol** ?

La ressource en eau est essentielle pour de nombreux usages (eau potable, agriculture, industrie, énergie) ainsi que pour les milieux naturels.

Avec l'augmentation des températures et l'évolution saisonnière du cumul de précipitation, le changement climatique a de fortes conséquences sur le cycle de l'eau et la ressource en eau disponible. Dans ce paragraphe, on analyse l'évolution de l'évapotranspiration potentielle, du bilan hydrique et des impacts sur l'humidité du sol et la sécheresse.

Ces diagnostics seront précisés ultérieurement sur les débits des cours d'eau et les hauteurs de nappe dans le cadre des travaux menés dans le cadre du projet Explore2.

Évolution de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'ETP, exprimée en millimètres, peut se définir comme la somme de la transpiration du couvert végétal, à travers les stomates des plantes, et de l'évaporation du sol qui pourrait se produire en cas d'approvisionnement en eau suffisant (disponibilité en eau non limitative) pour un couvert végétal bas, continu et homogène sans aucune limitation (nutritionnelle, physiologique ou pathologique).

Il existe plusieurs formules de calcul de l'ETP, utilisant un nombre plus ou moins important de variables météorologiques et pouvant conduire à des résultats absolus assez différents. Par la suite c'est la formule Penman Monteith de la FAO qui est utilisée avec extrapolation Hargreaves pour la variable rayonnement (mal simulée par certains modèles climatiques régionaux).

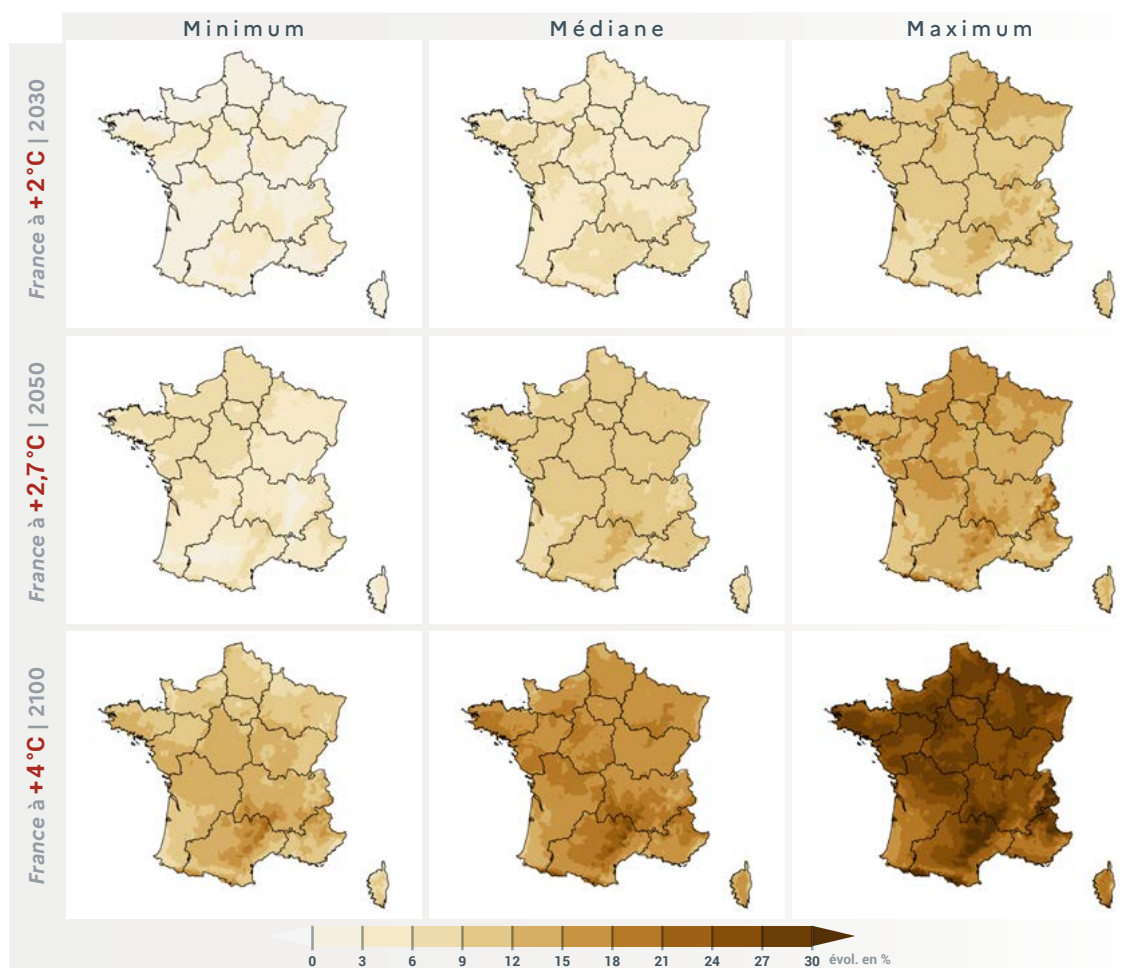


Figure 20 : Évolution du cumul annuel d'évapotranspiration potentielle selon les niveaux de réchauffement France à +2°C, +2,7°C et +4°C en %, horizons TRACC 2030, 2050 et 2100, selon les valeurs min, médiane et max de l'ensemble TRACC-2023.

La figure 20 présente l'évolution du cumul annuel de l'ETP sur la France selon les trois niveaux de la TRACC :

- Dans une France de +2°C, la hausse à l'échelle de la France du cumul annuel de l'ETP est de l'ordre de +6% (entre +3% et +10% selon les simulations).
- Dans une France de +2,7°C, la hausse à l'échelle de la France du cumul annuel de l'ETP est de l'ordre de +10% (entre +6% et +14% selon les simulations).
- Dans une France à +4°C, horizon 2100 de la TRACC, la hausse à l'échelle de la France du cumul annuel de l'ETP est de l'ordre de +17% (entre +13% et +26% selon les simulations). Cette hausse est relativement uniforme sur l'ensemble des régions.

Évolution du bilan hydrique (pluie - ETP)

Le bilan hydrique, exprimé en millimètres, est défini comme l'écart entre le cumul annuel de précipitation et l'évapotranspiration potentielle. Cet indicateur fréquemment utilisé pour les applications hydrologiques ou agrométéorologiques renseigne sur l'évolution globale de la ressource en eau et du déficit en eau de la végétation ainsi que des besoins potentiels d'irrigation.

La figure 21 présente l'évolution du bilan hydrique sur la France hexagonale selon les trois niveaux de la TRACC :

- Dans une France à +2°C, l'évolution du bilan hydrique à l'échelle de la France est faible (-2 mm par an) mais avec une forte incertitude selon les simulations (entre -86 mm par an et +46 mm par an)
- Dans une France à +2,7°C, horizon 2050 de la TRACC, la baisse du bilan hydrique à l'échelle de la France atteint -45 mm par an (entre -96 mm par an et +81 mm par an selon les simulations)
- Dans une France à +4°C, horizon 2100 de la TRACC, la baisse du bilan hydrique s'accroît encore pour atteindre -116 mm par an à l'échelle de la France (entre -216 mm par an et -40 mm par an selon les simulations), soit l'équivalent de un à deux mois de pluie. L'incertitude sur l'évolution ne concerne que l'extrême est et nord du pays. Les baisses les plus fortes sont prévues sur l'extrême sud du pays, des Pyrénées à l'Occitanie et aux régions méditerranéennes, avec des pertes d'eau supérieures à 200 mm par an ce qui représente un tiers du cumul annuel de précipitations en moins.

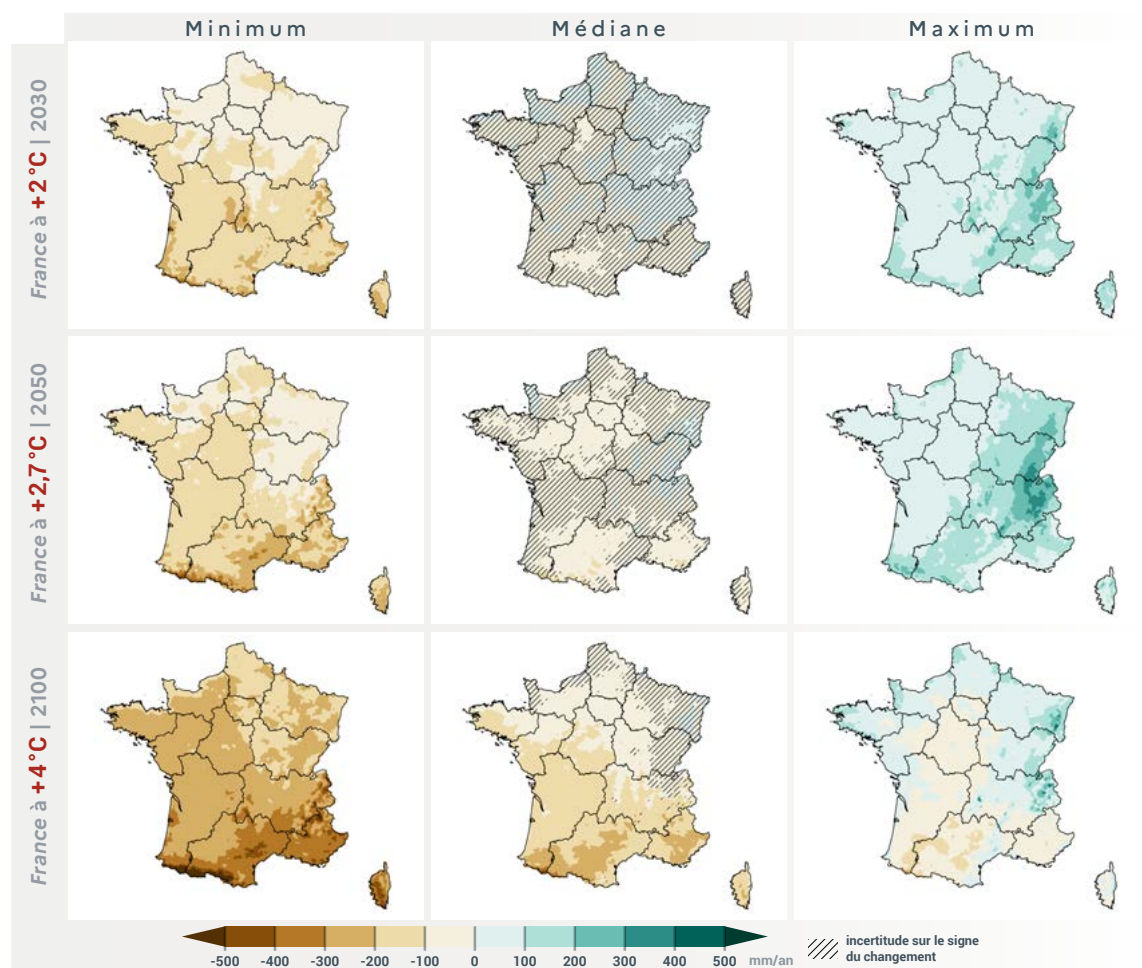


Figure 21 : Évolution du bilan hydrique (écart entre le cumul annuel de précipitation et l'ETP) selon les niveaux de réchauffement France à +2°C, +2,7°C et +4°C, horizons TRACC 2030, 2050 et 2100, selon les valeurs min, médiane et max de l'ensemble TRACC-2023. Présence de hachures en l'absence d'accord sur le signe du changement pour au moins 80% des simulations

Évolution de l'humidité du sol

L'humidité superficielle du sol renseigne sur la ressource en eau disponible pour la végétation. Elle est caractérisée par l'indicateur SWI (Soil Wetness Index, indice d'humidité du sol) évoluant principalement entre la valeur +1 (végétation disposant de toute l'eau utile pour son développement) et la valeur 0 (végétation ne disposant plus d'eau pour son développement). Le seuil 0,4 correspond à un seuil de stress hydrique fort ayant des impacts négatifs importants pour la végétation.

La figure 22 présente l'évolution du nombre de jours de sol sec (SWI inférieur à 0,4) sur la France selon les trois niveaux de la TRACC :

- Dans une France à +2°C, le nombre de jours de sol sec augmente de +13 jours en moyenne sur la France (entre +2 j. et +33 j. selon les simulations).
- Dans une France à +2,7°C, le nombre de jours de sol sec augmente d'environ 24 jours en moyenne sur la France (entre +2 j. et +41 j. selon les simulations).

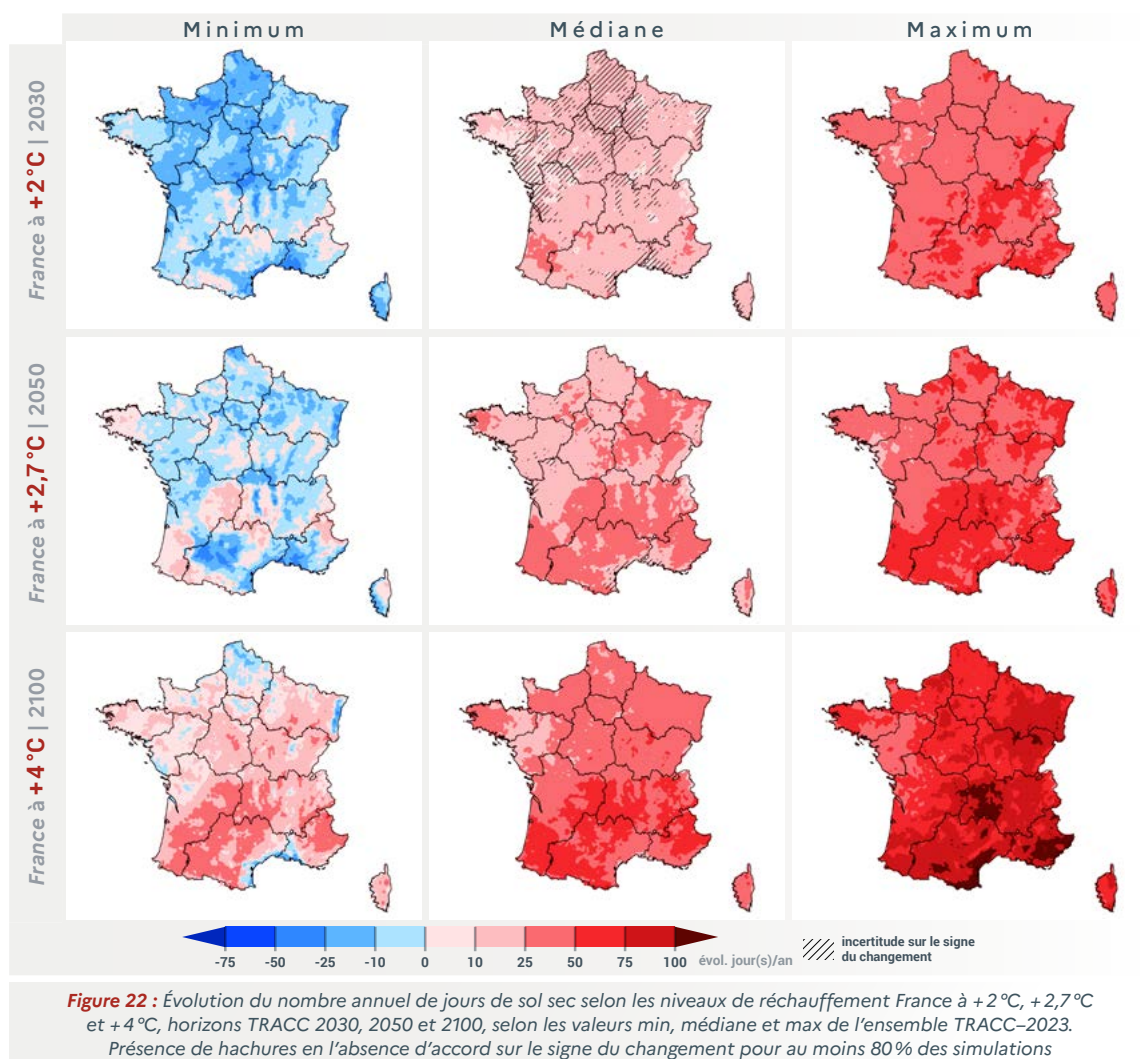
- Dans une France à +4°C, le nombre de jours de sol sec augmente de 39 jours en moyenne sur la France (entre +23 j. et +68 j. selon les simulations). L'augmentation est plus forte sur la moitié sud où elle approche souvent les 2 mois supplémentaires.

Quelques valeurs sur six villes en France

On présente dans le tableau ci-dessous les valeurs médianes de l'ensemble TRACC-2023 pour le nombre moyen annuel de jours de sol sec (ainsi que les valeurs minimales et maximales entre crochets).

Nombre de jours de sol sec	1976–2005	France à +2°C	France à +2,7°C	France à +4°C
Lille	91	105 [69;138]	108 [89;148]	117 [91;162]
Paris	113	122 [105;157]	128 [104;149]	143 [111;178]
Brest	95	111 [84;140]	124 [99;137]	133 [106;157]
Lyon	64	82 [58;113]	91 [59;116]	113 [85;148]
Toulouse	107	121 [97;162]	139 [90;154]	160 [114;200]
Marseille	190	202 [151;238]	203 [167;238]	219 [190;281]

Il est rappelé que les valeurs présentées correspondent aux valeurs moyennes sur 20 ans. Des valeurs beaucoup plus fortes peuvent être observées une année particulière selon les principes de la variabilité (cf. chapitre précédent).



Évolution de la sécheresse du sol avec les narratifs

On rappelle d'abord que la sécheresse est définie selon l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) comme un déficit anormal d'une composante du cycle de l'eau sur une longue période. La sécheresse du sol, l'un des types de sécheresse, traduit un déficit de l'humidité du sol. Elle est généralement accompagnée de sécheresse météorologique liée à un déficit pluviométrique, ainsi que de sécheresse hydrologique (ou hydrogéologique) relevant d'un déficit sur les débits des cours d'eau ou les eaux souterraines.

L'indicateur recommandé par l'OMM pour caractériser la sécheresse météorologique est le SPI (Standardized Precipitation Index, indice de précipitation standardisé). Des indicateurs standardisés

équivalents ont été développés pour les autres types de sécheresse (Vidal et al., 2010) et sont utilisés à Météo-France pour caractériser la sécheresse du sol (voir l'encart D).

En complément de l'approche statistique classique, les narratifs peuvent aussi être utilisés pour caractériser les événements de sécheresse. On utilisera par la suite le narratif **S1** de la famille « évolution sèche » et le narratif **C3** de la famille « évolution contrastée », choisis pour leur bonne capacité à simuler les sécheresses passées.

Les familles « évolution sèche » et « évolution contrastée » qui sont toutes les deux caractérisées par une forte diminution des précipitations en été, sont les familles qui présentent une tendance la plus forte à l'augmentation des sécheresses du sol. Toutefois, le cumul hivernal de précipitation les différencie : la famille « évolution sèche » propose

D. Comment caractériser les sécheresses ?

Pour l'analyse des sécheresses du sol, on utilise la variable standardisée SSWI (Standardized Soil Wetness Index), issue du SWI (Soil Wetness Index) calculé par le modèle d'hydro-météorologie SIM2 de Météo-France.

Le processus de standardisation induit qu'une valeur de l'indice SSWI de 0 correspond à une valeur moyenne de SWI (par rapport à la climatologie de référence, définie sur la période 1976-2005). L'indice est négatif pour les périodes sèches, et positif pour les périodes humides (McKee et al., 1993). Ces indices standardisés ont l'avantage de n'utiliser que des valeurs mensuelles, de permettre des comparaisons entre régions aux climats différents, de quantifier la rareté d'une sécheresse. L'utilisation de ce type d'indice est recommandée par l'Organisation Météorologique Mondiale.

Le SSWI peut être calculé sur différents pas de temps : 1 mois, 3 mois, 6 mois, 12 mois, à partir de valeurs de SWI moyennées sur ces durées.

Les valeurs et signification d'un indice standardisé (ici le SSWI) sont les suivants :

- **SSWI > 0** : sol plus humide que la normale ;
- **SSWI < 0** : sol plus sec que la normale ;
- **-0,99 < SSWI < +0,99** : sol avec une humidité proche de la normale
- **SSWI < -2,0** : sol extrêmement sec ;
- **SSWI > 2,0** : sol extrêmement humide.

Les données d'un indice standardisé étant normalisées autour d'une loi normale centrée en 0 et d'écart-type 1, on peut aussi directement associer un temps de retour à une valeur de l'indicateur, ainsi : -0,84 pour un temps de retour 5 ans sec, -1,28 pour un temps de retour de 10 ans sec, -1,75 pour un temps de retour de 25 ans sec. Dans le cas du SSWI, la valeur de l'indice considérée pour l'identification d'une sécheresse est le temps de retour décennal soit -1,28.

Localement, en un point, un événement de sécheresse peut être défini par une période où l'indice SSWI est constamment sous le seuil choisi. Sa durée correspond à la période de temps où l'indice est sous le seuil, sa sévérité étant la valeur minimum de l'indice sur la durée de l'événement, et sa magnitude comme la somme des valeurs de l'indice sur cette même durée.

Pour définir des événements de sécheresse sur une zone géographique, comme la France, on doit prendre en compte l'aspect spatio-temporel.

Un événement de sécheresse (figure D1) est défini par une période d'au moins 3 mois consécutifs pendant lesquels au moins 10% de la surface du territoire présente un SSWI-1 mois inférieur au seuil de durée de retour 10 ans sec (soit -1,28). Les événements de sécheresse à l'échelle de la zone géographique sont alors caractérisés par leur durée (en nombre de mois), leur extension spatiale (en% du territoire touché), ainsi que leur intensité (définie à partir de la magnitude de toutes les mailles concernées par un SSWI inférieur au seuil). On peut alors comparer les événements de la période de référence et des périodes futures, en fonction de leur nombre et de leurs caractéristiques.

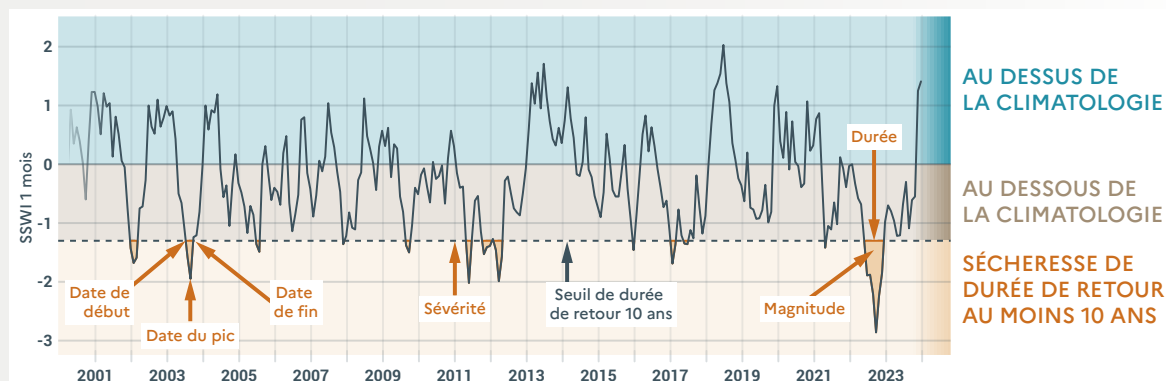


Figure D1 : Schéma de caractérisation des événements de sécheresse du sol à partir de l'indice SSWI : date de début, date de fin, sévérité et magnitude

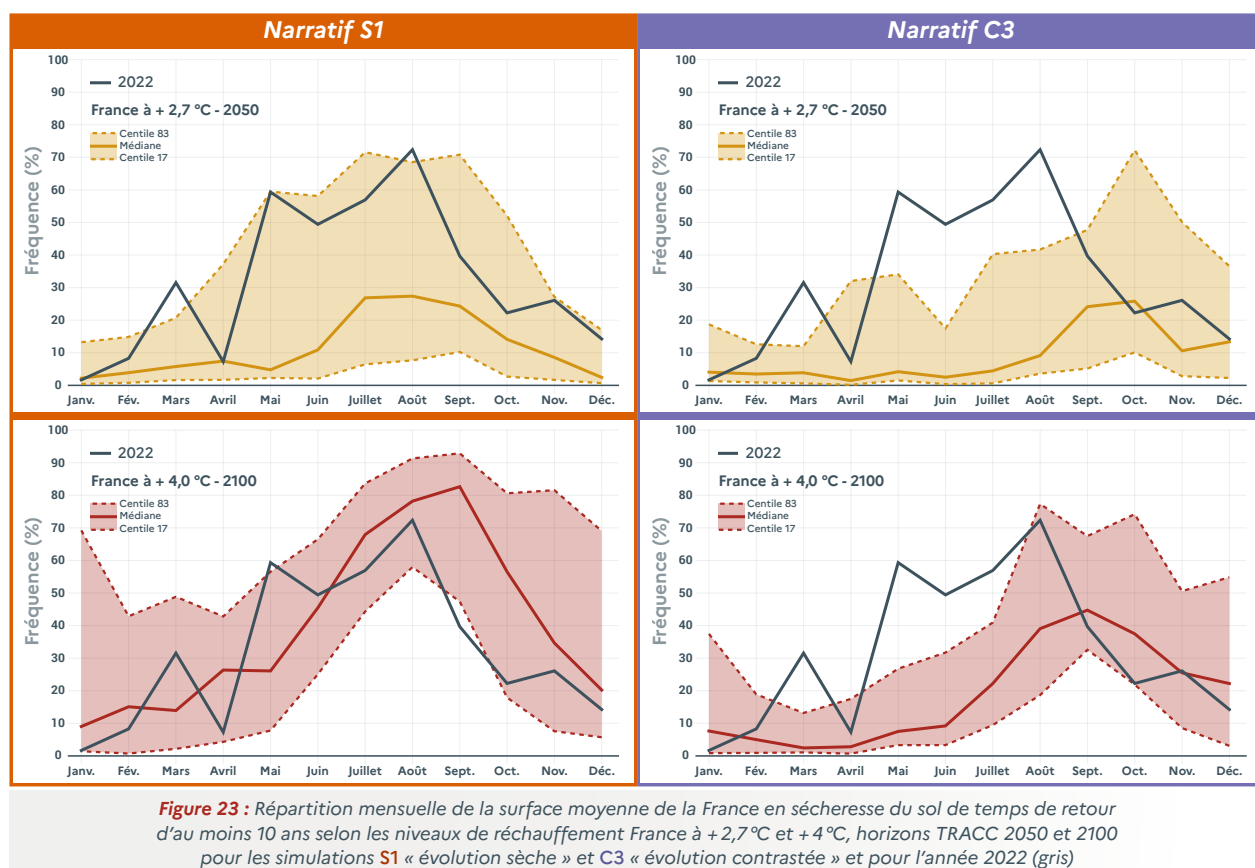


Figure 23 : Répartition mensuelle de la surface moyenne de la France en sécheresse du sol de temps de retour d'au moins 10 ans selon les niveaux de réchauffement France à +2,7°C et +4°C, horizons TRACC 2050 et 2100 pour les simulations **S1** « évolution sèche » et **C3** « évolution contrastée » et pour l'année 2022 (gris)

une faible augmentation du cumul de précipitation hivernal, alors que la famille « évolution contrastée » en propose au contraire une forte augmentation, ce qui impacte les caractéristiques des sécheresses du sol futures, notamment au printemps.

La sécheresse du sol peut être analysée sous différents angles : sa durée, son intensité et son étendue spatiale. Un premier diagnostic concerne l'étendue des conditions de sécheresse du sol pour la France (conditions de sécheresse définies par une durée de retour d'au moins 10 ans dans le climat actuel, voir l'encart D).

La figure 23 présente pour les deux narratifs (**S1** à gauche, **C3** à droite) et pour les deux niveaux de réchauffement France à +2,7°C (en haut) et France à +4°C (en bas), la surface du territoire français en sécheresse du sol. Les plages colorées représentent l'ensemble des valeurs de surface en sécheresse des 20 années de chaque niveau de réchauffement. Ainsi, les deux narratifs montrent des surfaces touchées par la sécheresse du sol importantes au cœur de l'été, mais aussi dès le printemps et jusqu'à l'au-

tomne, en particulier au niveau de réchauffement France à +4°C. Le narratif **S1** notamment propose des sécheresses du sol très étendues au printemps et à l'automne, en lien avec une faible hausse des précipitations hivernales. Au cœur de l'été, au niveau de réchauffement France à +4°C, au moins 35% de la France (narratif **C3**) ou au moins 60% de la France (narratif **S1**) connaissent chaque année des conditions de sécheresse du sol qui ont actuellement une durée de retour supérieure ou égale à 10 ans (et jusqu'à 80 ou 90% de la France pour les années les plus sèches).

Les niveaux de la sécheresse du sol de l'année 2022 restent élevés (mais possibles) dans une France à +2,7°C. Dans une France à +4°C, 2022 est une année moyenne pour le narratif c, et sèche au printemps / été mais moyenne en automne pour le narratif l.

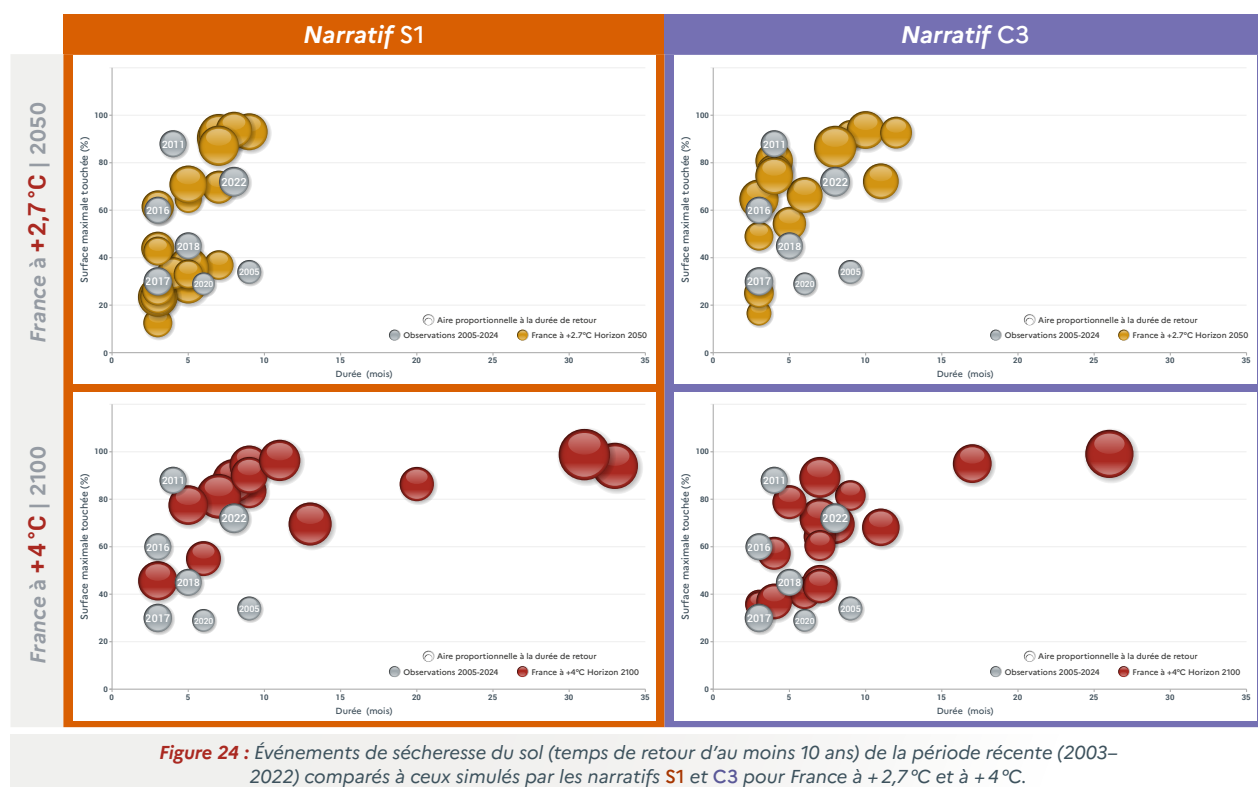
Évolution des événements de sécheresse du sol

L'analyse des événements de sécheresse du sol (dans toutes leurs dimensions : intensité, durée, étendue spatiale) peut être considérée à travers une approche selon les narratifs. La *figure 24* présente les événements de sécheresse du sol proposés par les deux narratifs **S1** « évolution sèche » et **C3** « évolution contrastée » pour les deux niveaux de réchauffement France à +2,7°C et France à +4°C. Les deux narratifs proposent des événements de sécheresse du sol plus intenses, plus longs, plus étendus et plus nombreux.

Dans une France à +2,7°C apparaissent des événements touchant la quasi-totalité du territoire français (contre 80% au maximum dans le climat récent).

Dans une France à +4°C, des épisodes longs (de 24 à 36 mois) sont également présents dans les deux narratifs, signifiant une succession de deux à trois années en condition de sécheresse du sol.

Par rapport au climat récent (2005–2024), le nombre d'épisodes de sécheresse du sol est multiplié par un facteur de l'ordre de 2 pour le narratif **C3**, et de l'ordre de 3,5 à 4,5 dans le narratif **S1**.



En résumé pour la ressource en eau et la sécheresse du sol

Pour un niveau de réchauffement France à +4°C :

- L'évapotranspiration potentielle de la végétation augmente fortement à l'échelle de la France (de près de 20%) et le bilan hydrique est réduit (de plus de 100 mm soit l'équivalent de 1 à 2 mois de pluie).
- La diminution du bilan hydrique est plus marquée dans les régions méridionales tandis que cette baisse est parfois incertaine près des frontières nord et est du pays.
- Le nombre de jours de sol sec augmente de 1 mois dans la moitié nord et jusqu'à 2 mois dans la moitié sud.
- Le nombre de jours de sol sec atteint 4 à 5 mois dans la moitié nord et jusqu'à plus de 7 mois sur les régions méditerranéennes.
- Les sécheresses deviennent fréquentes en été et en automne. Certains événements de sécheresse peuvent s'étaler sur plusieurs années consécutives.
- Une sécheresse telle que connue en 2022 devient un événement fréquent en été.

6. Quelle évolution du risque de feux ?

Le risque d'incendie est un phénomène bien connu des régions méditerranéennes au climat aride, mais aussi d'autres régions méridionales fortement vulnérables telles que les Landes.

Sous l'influence principale de l'augmentation de la température, qui accentue la sécheresse de la végétation, le changement climatique entraîne une aggravation du risque météorologique de feux de forêt (caractérisé par le nombre de jours annuels avec $IFM \geq 40^3$).

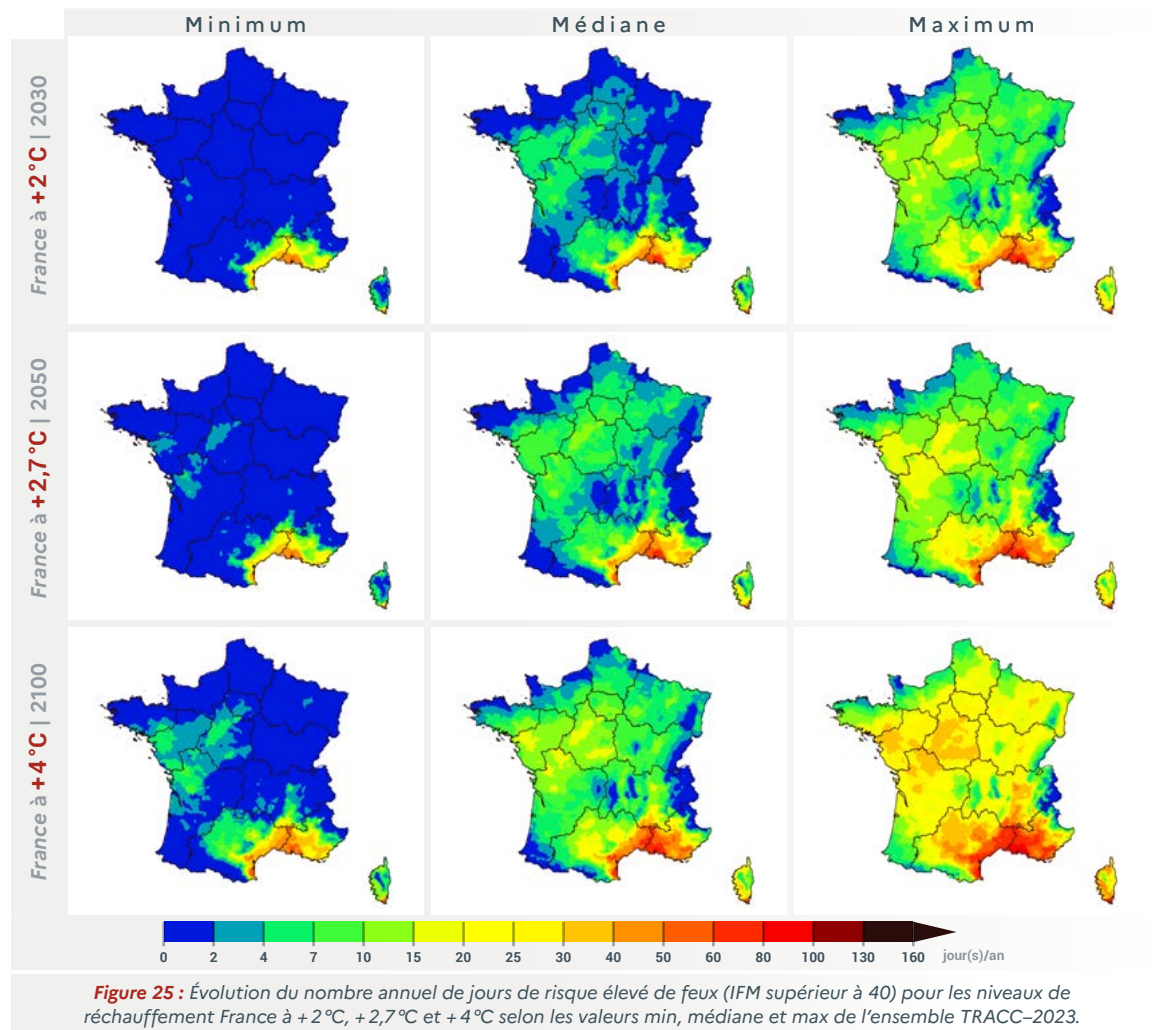
Les années récentes ont montré la possibilité d'extension de ce risque dans de nombreuses régions françaises. En 2022, 90 départements de métropole ont été concernés par au moins un feu significatif.

En climat futur, cette aggravation, présentée sur la figure 25, se traduit par une extension spatiale et temporelle des zones exposées au risque météorologique Feux de Forêt. On observe principalement :

- En moyenne sur la France, le nombre de jours qui était proche de 1 sur la période de référence, dépasse 3 jours dans une France à $+2,7^\circ\text{C}$ (minimum à 0 et maximum à 8 jours selon les simulations) et 7 jours dans une France à $+4^\circ\text{C}$ (minimum à 2 j., maximum à 18 jours). Le Centre-Ouest, avec une moyenne d'une vingtaine de jours par an, connaît des conditions équivalentes à celles observées actuellement en moyenne dans les régions méditerranéennes.
- une forte aggravation dans les régions méditerranéennes déjà touchées aujourd'hui, avec une multiplication par 2 des jours de dangers très élevés, dépassant localement les 80 jours en moyenne par an, dans une France à $+4^\circ\text{C}$.

Par ailleurs, ces évolutions sont associées à un allongement de la saison de risque élevé à modéré des feux (non montré ici), avec un démarrage plus précoce et une fin de campagne plus tardive en automne. Dans une France à $+4^\circ\text{C}$, dans certaines régions, la saison complète des risques de feux (risques modéré et élevé) pourrait durer 1 à 2 mois supplémentaires.

3. IFM = Indice Forêt Météo : Les conditions de propagation et d'intensité des feux de forêt étant fortement liées aux conditions météorologiques, Météo-France s'appuie sur l'Indice Forêt Météorologique (IFM) qui caractérise la propension d'un feu de forêt à s'aggraver et se propager, sous l'influence des conditions météorologiques. Il est évalué à partir de paramètres météorologiques : température, humidité de l'air, vitesse du vent et précipitations mais ne tient pas compte de la présence effective d'une végétation sensible au feu.



En résumé pour le risque de feux

Pour un niveau de réchauffement France à +4°C :

- Le risque élevé de feu se généralise à l'ensemble du pays et concerne des régions peu touchées jusqu'à présent.
- Certaines régions de la moitié nord (régions de la Loire au Bassin parisien) connaissent un risque de feu élevé selon des fréquences rencontrées à ce jour sur l'arrière-pays méditerranéen.
- Sur les régions méditerranéennes, le nombre de jours de seuil élevé est multiplié par deux.
- La saison de risque élevé ou modéré de feux s'allonge de 1 à 2 mois dans certaines régions.

7. Quelle évolution de l'enneigement en montagne ?

La présence de neige en montagne en hiver est importante pour la ressource en eau (stockage naturel des précipitations) avec des impacts sur les activités humaines (hydroélectricité, tourisme des sports d'hiver, agropastoralisme) et sur les milieux naturels de manière générale y compris sur l'évolution des glaciers.

L'enneigement est fortement variable d'une année à l'autre et cette variabilité va se poursuivre à l'avenir. L'enneigement naturel, considéré ici, n'est pas directement pertinent pour analyser les conditions d'exploitation des domaines skiables, qui recourent au damage et la production de neige dans le cadre de leurs activités.

En climat futur, la hausse des températures se traduit par une baisse de l'enneigement à moyenne altitude au cœur de l'hiver (du fait de la remontée de la limite pluie-neige des précipitations) et à toutes altitudes au printemps (du fait d'une fonte plus rapide dans un climat plus chaud). Ainsi, dans un climat plus chaud, il y aura de plus en plus d'hivers peu enneigés et de moins en moins d'hivers bien enneigés par rapport à

la période de référence, sans exclure un hiver particulièrement bien enneigé, de façon de plus en plus rare selon l'évolution des températures et des précipitations hivernales (cf. chapitre variabilité).

Dans une France à +4°C, le nombre de jours avec enneigement supérieur à 5 cm (*tableau 2*) est réduit selon les massifs et l'altitude (selon la période de référence) de 1 à 2 mois aux altitudes les plus hautes, et de 2 à 3 mois aux altitudes moyennes et basses.

Aux altitudes moyennes à basses (inférieures à 2000 m), la durée totale de neige au sol se limite entre un et deux mois, à l'exception des Alpes du Nord.

Evolution de l'enneigement avec les narratifs

La *figure 26* présente des indicateurs sur la répartition mensuelle de l'enneigement au cours de l'hiver et sa durée totale à partir de deux narratifs, le narratif **S3** de la famille « évolution sèche » et le narratif **C3** de la « évolution contrastée ». De manière générale, la baisse de l'enneigement est attendue la plus forte dans la famille « évolution sèche » connaissant moins de précipitation en hiver.

Massif	Altitude	Référence 1976–2005	France à +2 °C	France à +2,7 °C	France à +4 °C
Alpes du Nord	2 400 m	176 j.	168 j.	165 j.	150 j.
Alpes du Sud	2 400 m	170 j.	158 j.	152 j.	121 j.
Pyrénées	2 400 m	169 j.	157 j.	148 j.	116 j.
Corse	2 400 m	171 j.	162 j.	152 j.	121 j.
Alpes du Nord	1 800 m	158 j.	141 j.	132 j.	100 j.
Alpes du Sud	1 800 m	132 j.	97 j.	85 j.	52 j.
Pyrénées	1 800 m	132 j.	92 j.	77 j.	41 j.
Corse	1 800 m	138 j.	96 j.	74 j.	35 j.
Jura	1 200 m	132 j.	104 j.	78 j.	46 j.
Massif-Central	1 200 m	65 j.	39 j.	30 j.	10 j.
Vosges	1 200 m	136 j.	112 j.	83 j.	56 j.

Tableau 2 : Évolution de la valeur médiane du nombre de jours avec hauteur de neige supérieure à 5 cm pour différents massifs et altitudes selon les niveaux de réchauffement France à +2 °C, +2,7 °C et +4 °C (médiane de l'ensemble TRACC-2023⁴)

4. Pour les simulations d'enneigement, l'ensemble TRACC 2023 se limite à 10 simulations.

Avec le narratif S3, la hauteur de neige moyenne de novembre à avril est en forte baisse dans les différents massifs considérés, avec un enneigement se limitant souvent au cœur de l'hiver (janvier à mars). Dans une France à +4°C, la durée totale continue de l'enneigement au-dessus du seuil de 5 cm devient inférieure à 45 jours à basse et moyenne altitude, à l'exception des Alpes du Nord. L'enneigement continu ne débute plus que courant janvier, au lieu de mi-décembre généralement aujourd'hui, et se termine en mars, contre mi-avril aujourd'hui.

Avec le narratif C3, la baisse de l'enneigement est moins rapide pour les niveaux de réchauffement France à +2°C et +2,7°C mais s'accélère au niveau France à +4°C pour devenir parfois pire à celle du narratif S3, illustrant l'effet de fortes précipitations en hiver associées à des températures de plus en plus douces.

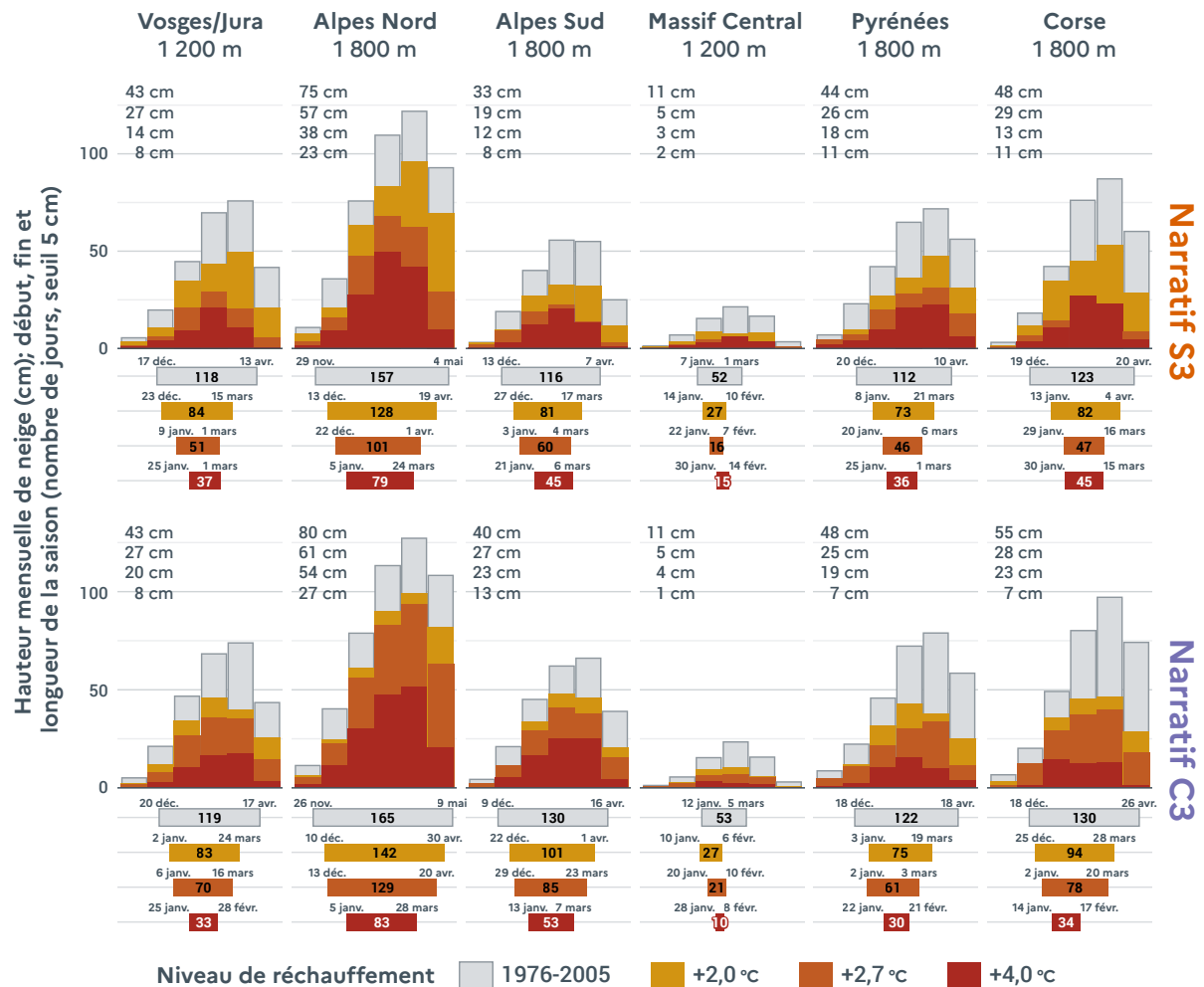
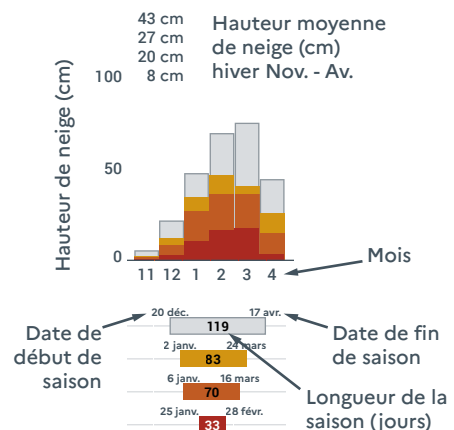


Figure 26 : Évolution de la hauteur mensuelle de neige, de la durée (début, fin) d'enneigement avec une hauteur seuil de 5 cm, pour 5 massifs et altitudes, selon les niveaux de réchauffement France à +2°C, +2,7°C et +4°C. La description des informations est décrite dans la figure ci-contre.



En résumé pour l'enneigement en montagne

Pour un niveau de réchauffement France à +4°C :

- Le nombre de jours de neige au sol en hiver se réduit fortement sur tous les massifs, de 1 à 2 mois en moyenne aux altitudes les plus hautes, et de 2 à 3 mois en moyenne aux altitudes moyennes et basses.
- En moyenne montagne, la présence de la neige au sol se réduit progressivement à la période du cœur de l'hiver (mi-janvier à mi-mars) et la saison d'enneigement continu devient en moyenne inférieure à 2 mois.

8. Quelle évolution des tempêtes ?

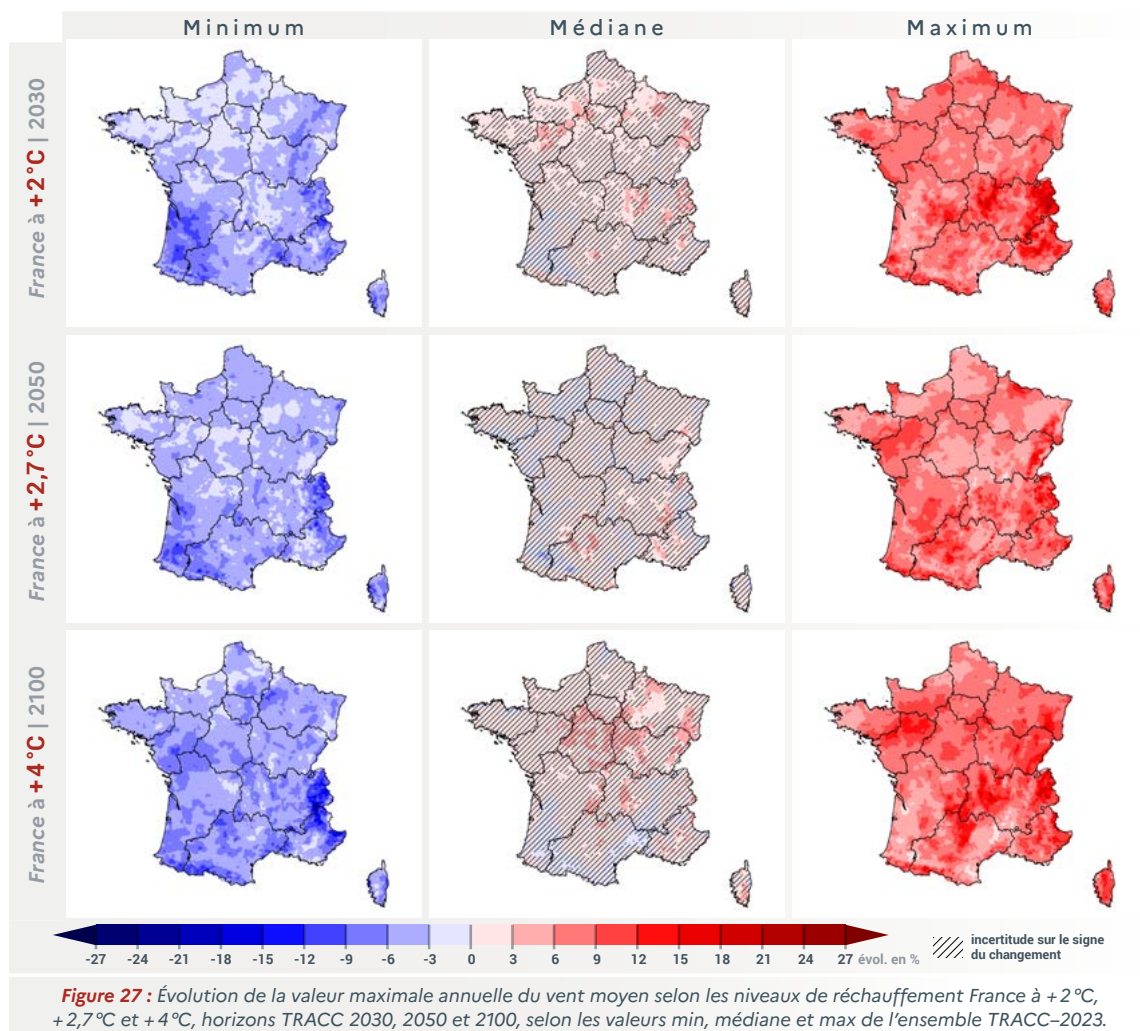
Les tempêtes font partie des événements météorologiques extrêmes causant le plus de victimes et de dégâts en France. Ces dernières décennies, nous n'observons pas d'évolution à la hausse de la fréquence ou de l'intensité de ces événements, mais une forte variabilité d'une décennie à l'autre (source Climat^{HD}).

Pour analyser le futur des tempêtes à partir des données de projections climatiques, nous considérons les données du maximum annuel de vent moyen

quotidien (en l'absence de données de rafales disponibles dans les projections climatiques actuelles).

Sur la *figure 27*, aucun signal ne se dégage sur l'évolution des vents forts aux trois horizons de la TRACC, se traduisant par la présence de hachure sur l'ensemble des régions.

À noter que ces données issues de modèles climatiques régionaux ne rendent pas compte des rafales de vent se produisant lors des événements orageux intenses comme les fronts de rafales ou les tornades.



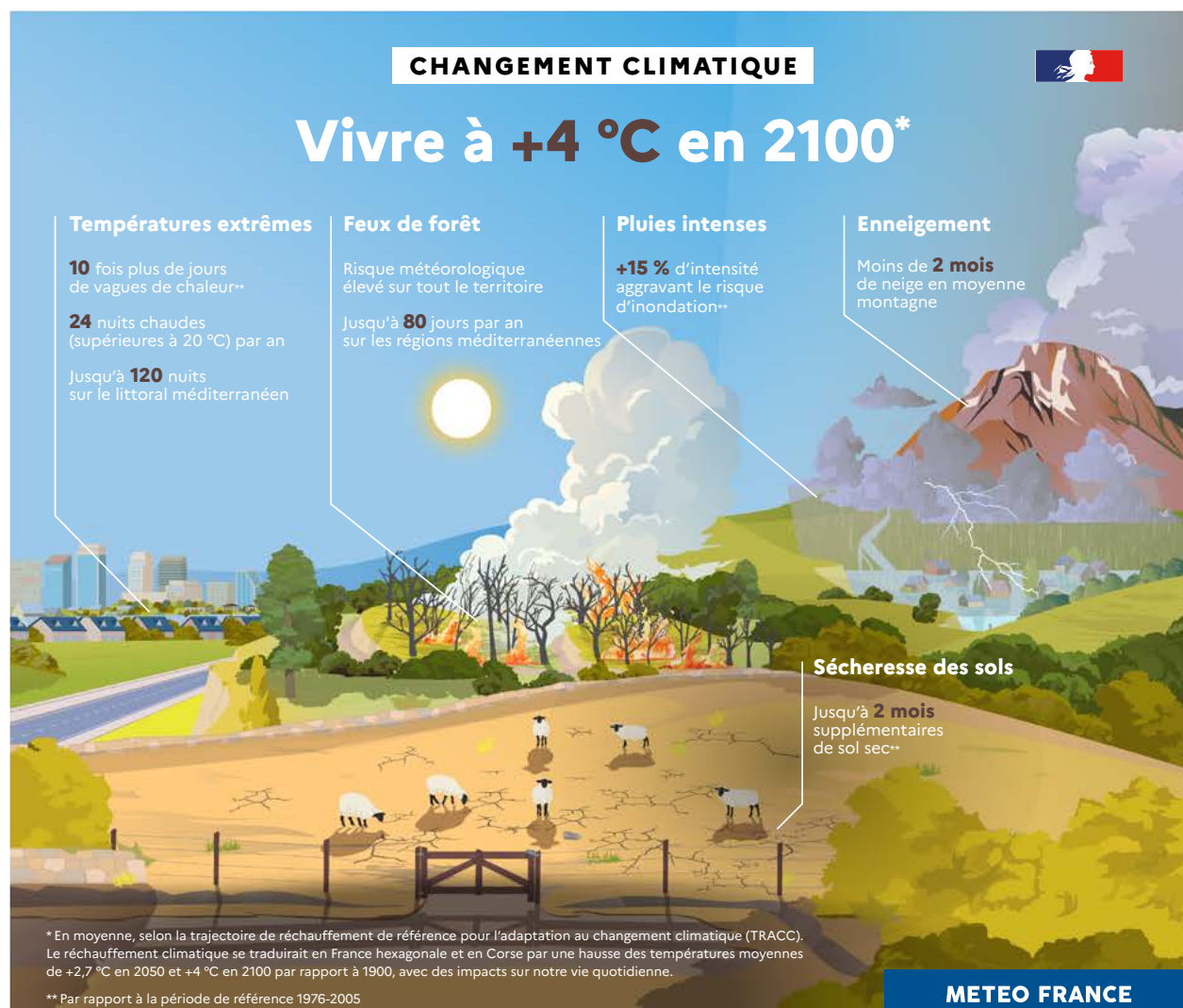
En résumé pour les tempêtes

Pour un niveau de réchauffement France à +4°C :

- Aucun signal n'apparaît sur l'évolution de l'intensité des vents forts tels que connus lors des événements de tempête.
- Ce diagnostic ne concerne pas les rafales de vent sous orage qui nécessitent d'être étudiées avec des modèles climatiques à haute résolution spatiale et à convection résolue.
- Le risque de submersion marine lors d'événement de tempête est cependant en forte hausse du fait de l'augmentation des niveaux marins.

Synthèse

Une synthèse graphique est proposée pour résumer les principaux résultats établis dans ce rapport.



Bibliographie

Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Habets, F., Soubeyroux, J.-M., Blanchard, M. et Baillon, M. (2010b)

« Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite »

Hydrology and Earth System Sciences, 14(3), 459-478. DOI : 10.5194/hess-14-459-2010

McKee, T., Doesken, N. et Kleist, J. (1993)

« The relationship of drought frequency and duration to time scales »

Dans : Preprints of the 8th Conference on Applied Climatology, p.179-184, Anaheim, California.

IPCC [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)] (2021)

« Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change »

Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi :10.1017/9781009157896

Vautard, R., Jan, G., Oldenborgh, V., Bonnet, R., Li, S., Robin, Y., Kew, S.F., Philip, S., Soubeyroux, J.M., Dubuisson, B., Viovy, N., Reichstein, M., Otto, F.E., & Cortázar-Atauri, I.G. (2022)

« Human influence on growing-period frosts like the early April 2021 in Central France »

Shepherd, T.G., Boyd, E., Calel, R.A. et al. (2018)

« Storylines : an alternative approach to representing uncertainty in physical aspect of climate change »

Climatic Change 151, 555–571. ► doi.org/10.1007/s10584-018-2317-9

Marson Paola, Corre Lola, Soubeyroux Jean Michel, Sauquet Eric, Robin Yoan et al (2024)

« Explore2 : rapport de synthèse sur les projections climatiques régionalisées »

METEOFRANCE, INRAE, Institut Pierre-Simon Laplace. ► hal.inrae.fr/hal-04443633

Caillaud, C., Somot, S., Douville, H., Alias, A., Bastin, S., Brienens, S., et al. (2024)

« Northwestern Mediterranean heavy precipitation events in a warmer climate : Robust versus uncertain changes with a large convection-permitting model ensemble. »

Geophysical Research Letters, 51, e2023GL105143. ► doi.org/10.1029/2023GL105143

Évin, Guillaume ; Hingray, Benoît ; Reverdy, Alix ; Ducharne, Agnès ; Sauquet, Éric (2024)

« Ensemble de projections Explore2 : Changements moyens et incertitudes associées »

Recherche Data Gouv, V2. ► doi.org/10.57745/KWH320

Corre, Lola, Aurélien Ribes, Sébastien Bernus, Agathe Drouin, Samuel Morin et Jean-Michel Soubeyroux

« Using regional warming levels to describe future climate change for services and adaptation: Application to the French reference trajectory for adaptation »

Climate Services. ► doi.org/10.1016/j.cliser.2025.100553

Remerciements

Ce rapport s'appuie sur les travaux des centres de modélisation climatique, qui mettent à disposition leurs données et permettent le développement des services climatiques et la mise en place d'actions d'adaptation ainsi que sur des modélisations réalisées dans le cadre du projet national [Explore2](#).

Nous exprimons notre reconnaissance à la communauté de modélisation régionale CORDEX, et plus spécifiquement au volet européen EURO-CORDEX, dont sont issues les 17 projections climatiques utilisées dans ce rapport. Nous remercions également la communauté de modélisation globale (CMIP), dont les travaux constituent une base indispensable à ces simulations climatiques régionales.

Nous souhaitons exprimer une reconnaissance particulière à la communauté française de recherche sur le climat et les impacts du changement climatique (Consortium Explore2) dont les travaux et l'expertise ont joué un rôle déterminant dans l'élaboration de ce rapport.

Liste des auteurs

Direction de la Climatologie et des Services climatiques

Jean-Michel Soubeyroux, Sébastien Bernus, Brigitte Dubuisson, Agathe Drouin, Thumette Madec, Fabienne Rousset, Raphaëlle Samacoïts, Michel Schneider, Marc Tardy, Flore Tocquer

Centre national de recherches météorologiques (CNRM)

Lola Corre, Samuel Morin, Aurélien Ribes, Samuel Somot

Citer le rapport

Jean-Michel Soubeyroux, Sébastien Bernus, Brigitte Dubuisson, Agathe Drouin, Thumette Madec, Fabienne Rousset, Raphaëlle Samacoïts, Michel Schneider, Marc Tardy, Flore Tocquer, Lola Corre, Samuel Morin, Aurélien Ribes, Samuel Somot - (2025)

« À quel climat s'adapter en France selon la TRACC ? - 2^e partie »

► www.drias-climat.fr/

Réalisation

Direction de la communication
Direction de la Climatologie et des Services climatiques
Centre national de recherches météorologiques

Météo-France
73 avenue de Paris
94165 Saint-Mandé Cedex

www.meteofrance.fr
[@meteofrance](https://x.com/meteofrance)
[@meteofrance.com](https://www.instagram.com/meteofrance)

© Météo-France 2025

