



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



**METEO
FRANCE**

À VOS CÔTÉS, DANS UN
CLIMAT QUI CHANGE

Les futurs du climat en France

Simulations du jeu TRACC-2023

Frédéric Long
10.04.2025

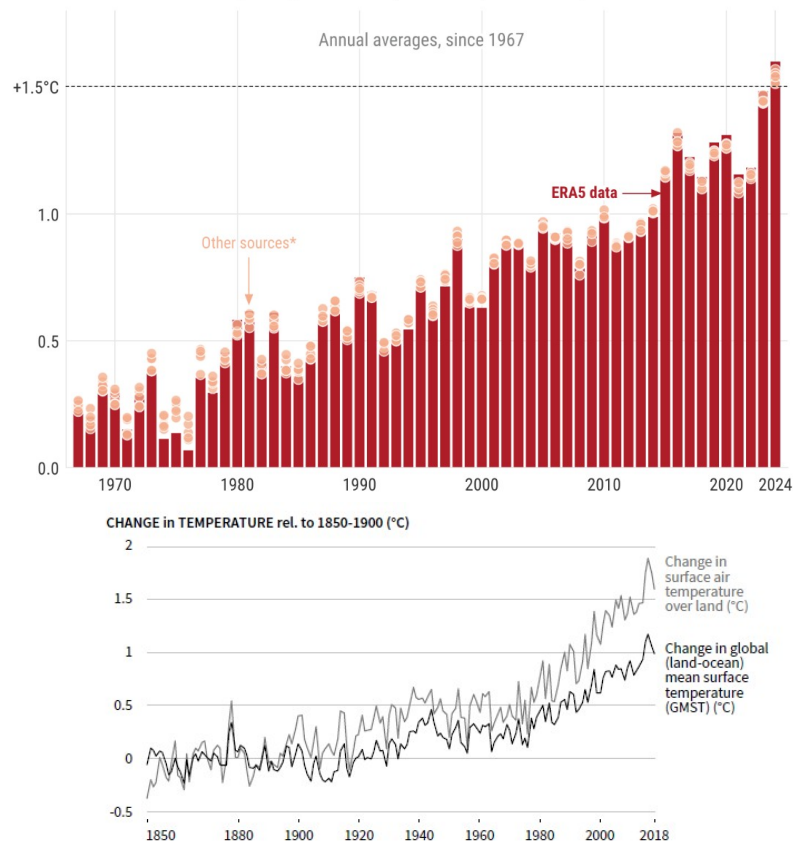
1. Quelques généralités à l'échelle planétaire

Evolution observée de la température moyenne globale de surface



Global surface temperature: increase above pre-industrial

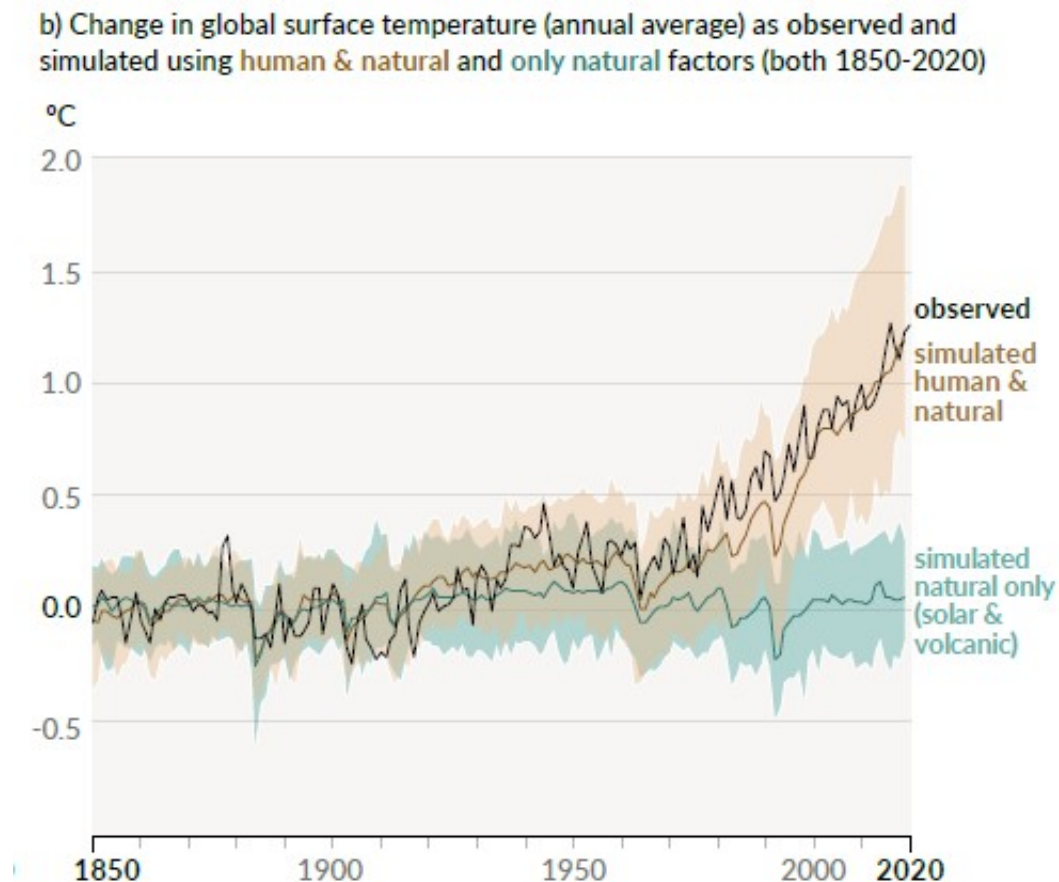
Reference period: pre-industrial (1850–1900) • Credit: C3S/ECMWF



- 2010-2019 : 1.1°C de hausse par rapport à 1850-1900.
- Des modulations de petite échelle temporelle liées à la variabilité interne, aux aérosols et aux forçages naturels.
- Une hausse plus marquée sur les continents, en zone arctique et en montagne.
- Les dix dernières années (2015 à 2024) sont les plus chaudes depuis le début de la série (1948).
- En 2024, on dépasse pour la première fois 1.5°C d'anomalie par rapport à la période pré-industrielle (1850-1900).

L'excès de gaz à effet de serre est-il le responsable ?

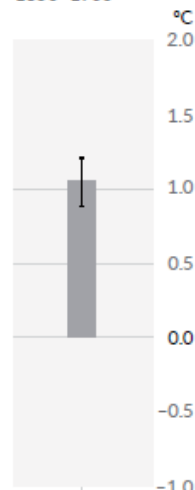
- Oui, sans équivoque selon les rapports du GIEC les plus récents (AR6).
- Quand on modélise le climat passé avec seulement les forçages naturels, on ne peut reproduire la hausse récente des températures



Contributions au réchauffement planétaire

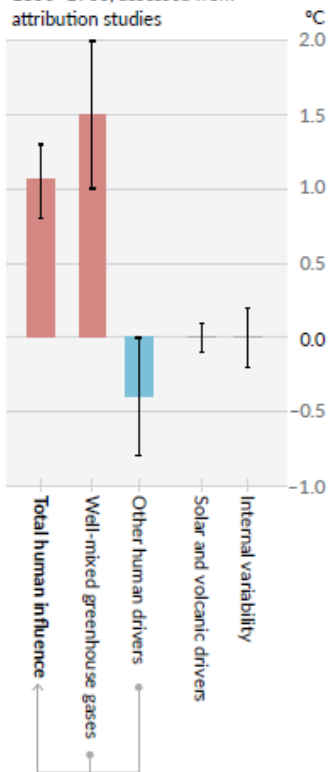
Observed warming

(a) Observed warming 2010–2019 relative to 1850–1900

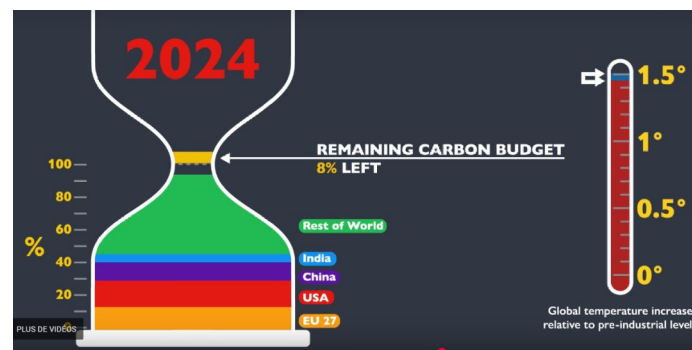
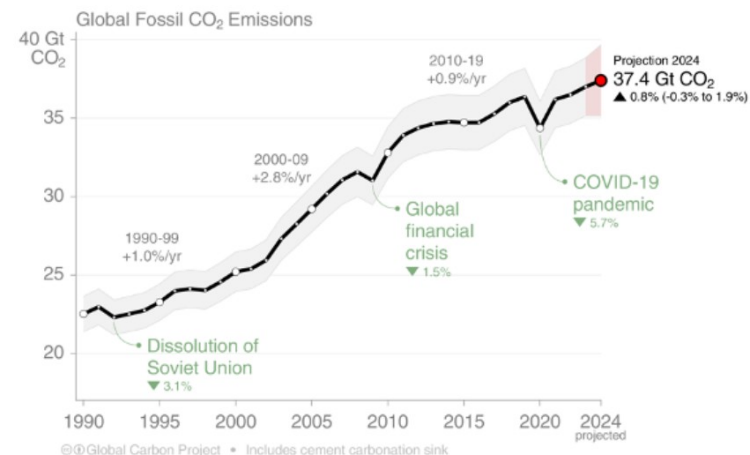
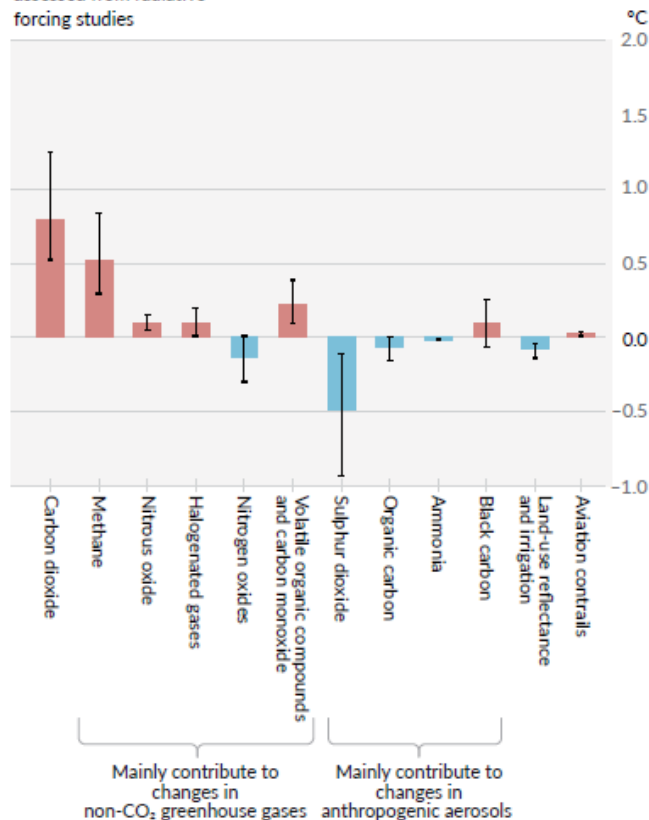


Contributions to warming based on two complementary approaches

(b) Aggregated contributions to 2010–2019 warming relative to 1850–1900, assessed from attribution studies

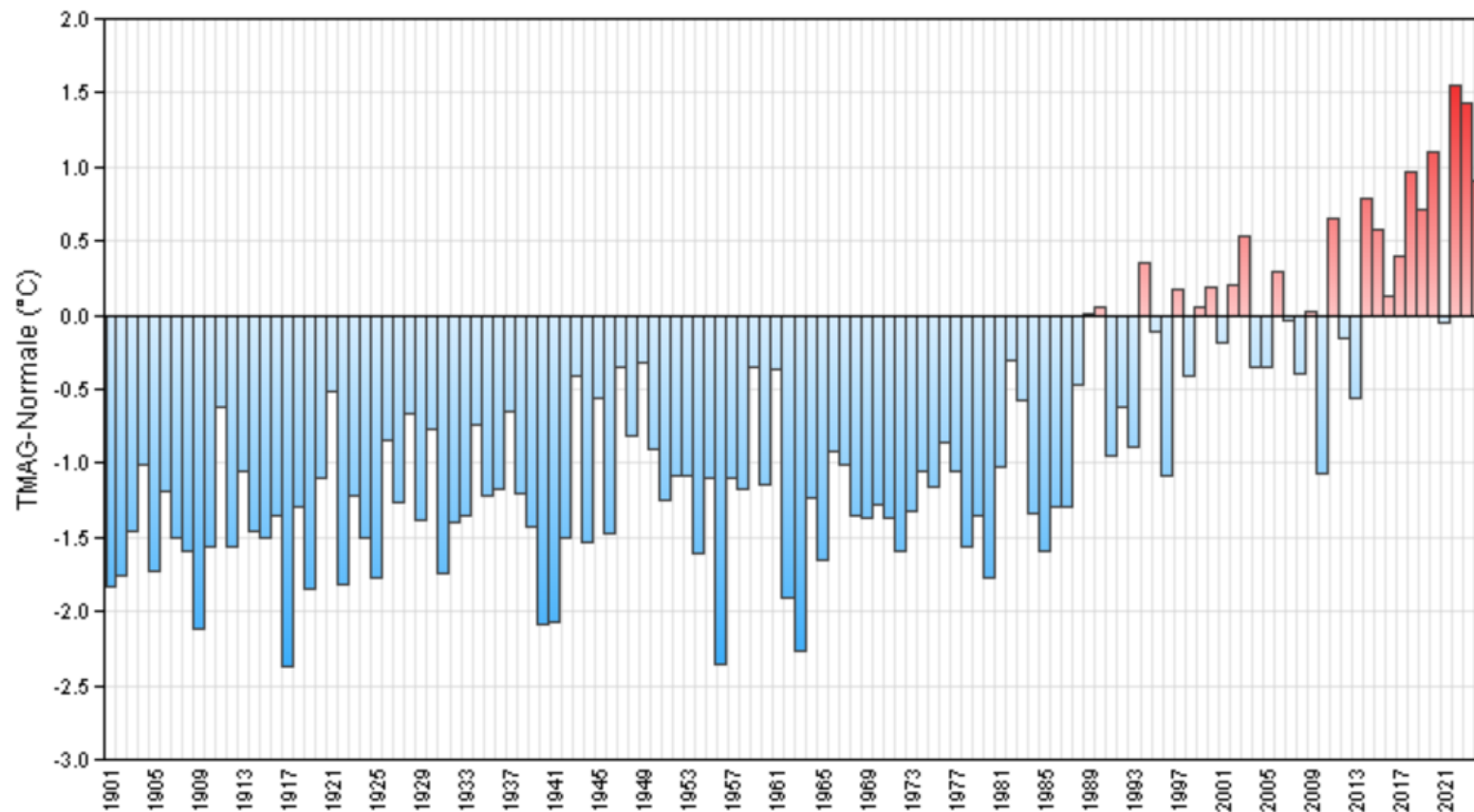


(c) Contributions to 2010–2019 warming relative to 1850–1900, assessed from radiative forcing studies



2. Le changement observé en France

Température moyenne annuelle France : écart à la normale 1991-2020

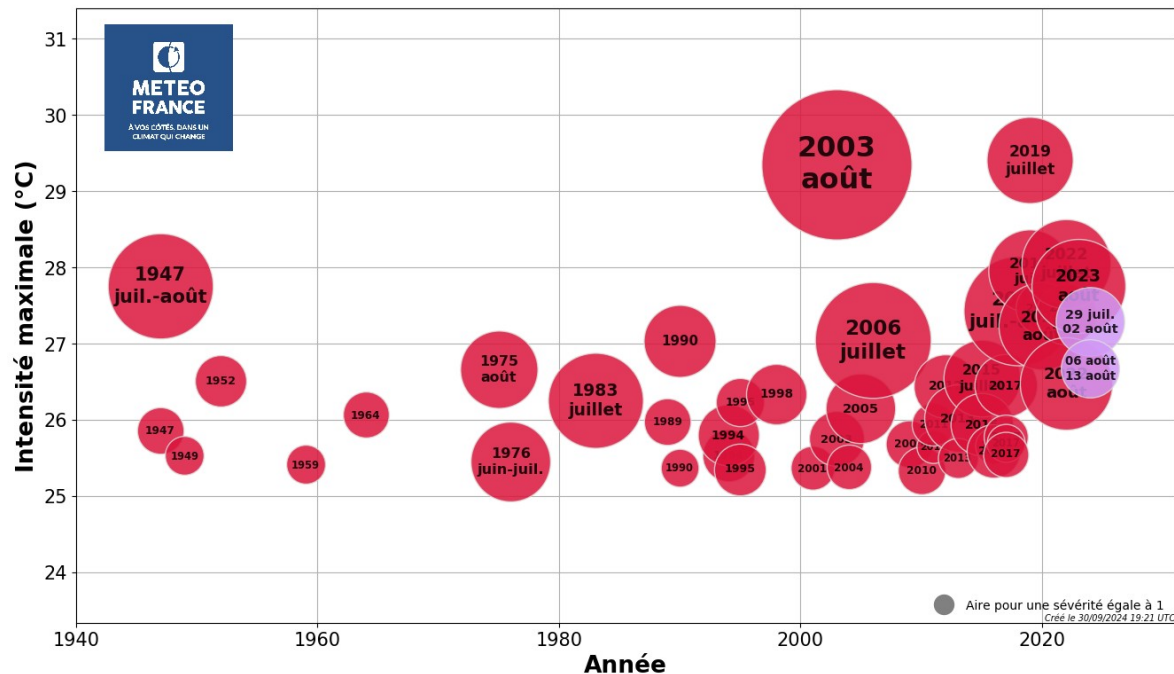


- Hausse moyenne de 1.4°C entre le début du XXe siècle et la période 1991-2020
- Les dix dernières années sont déjà sensiblement au-dessus en moyenne (+0.7°C)

Vagues de chaleur en France

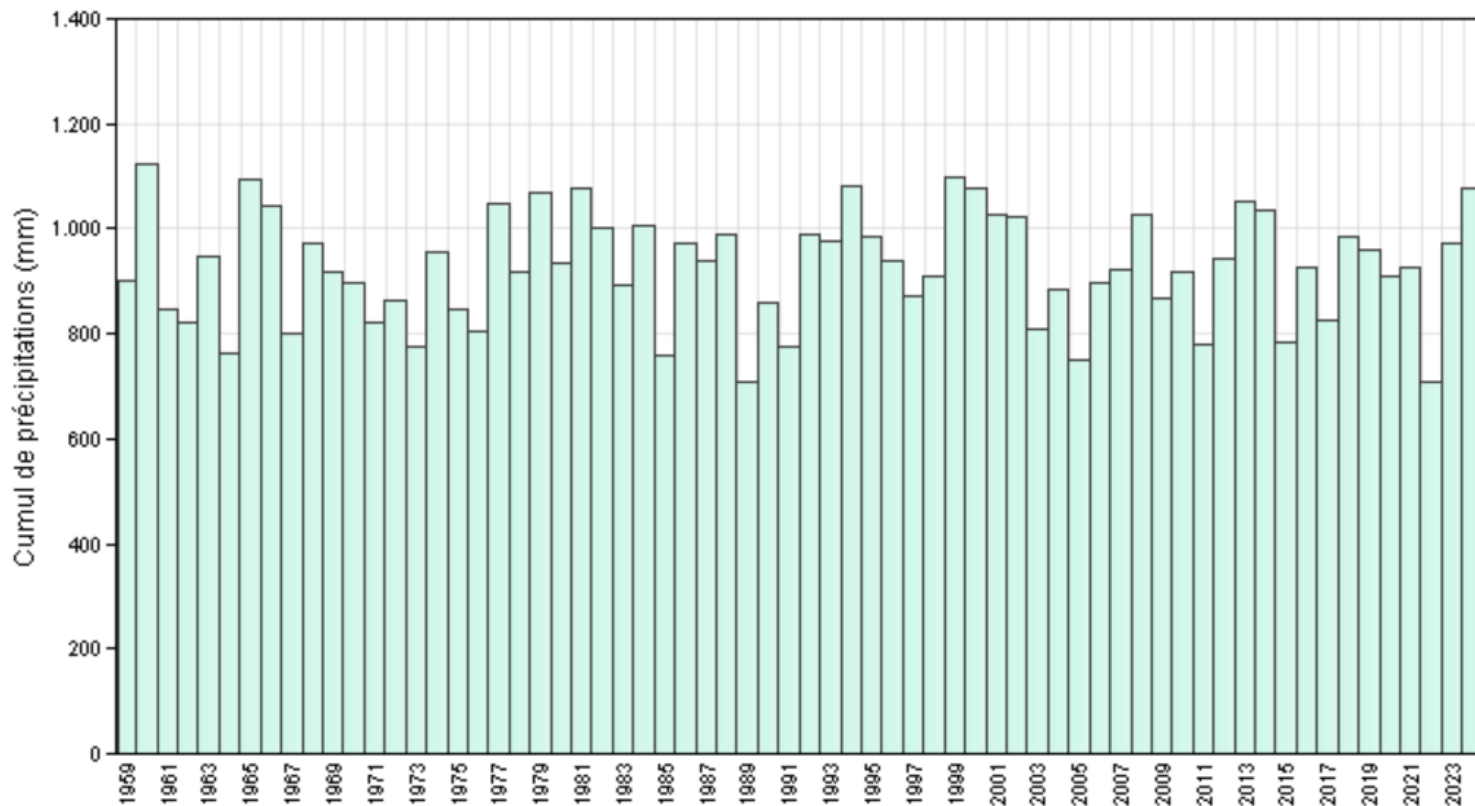
Vagues de chaleur observées

France



- Des vagues de chaleur plus sévères, et beaucoup plus nombreuses
- 12 vagues de chaleur entre 1947 et 1990
- 37 vagues de chaleur entre 1991 et 2024
- Des pics d'intensité plus élevés ces dernières années

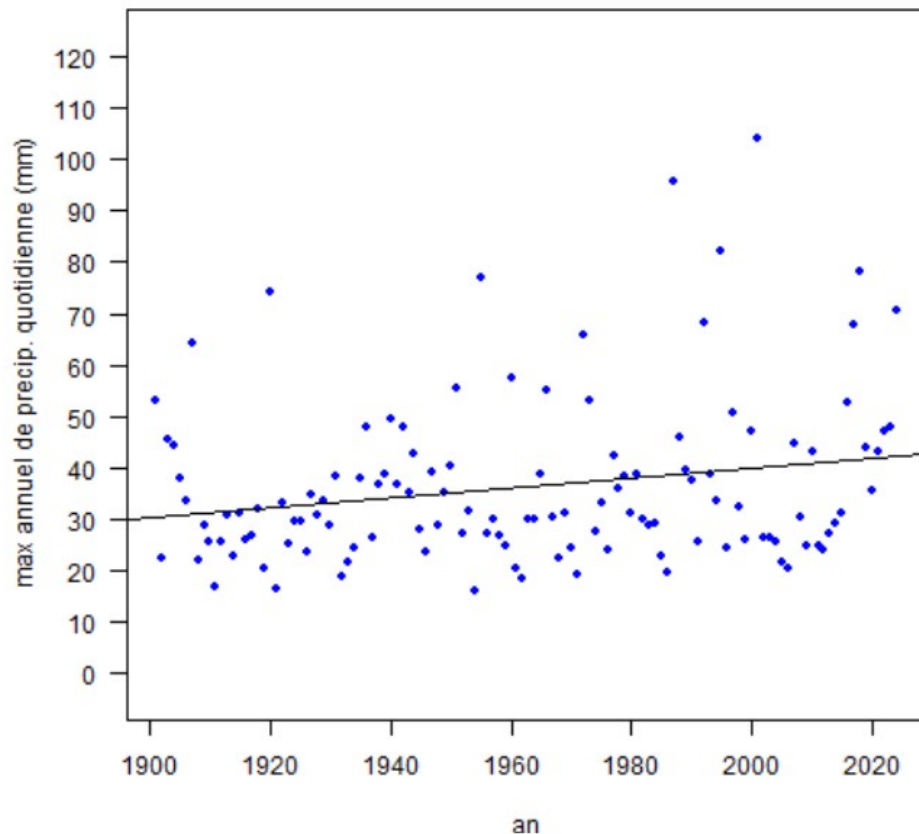
Cumuls annuels de précipitations agrégés sur la France de 1959 à 2024



- Pas de tendance particulière observée sur la période.
- Année 2022 très sèche (2^e rang derrière 1989), année 2024 très pluvieuse.

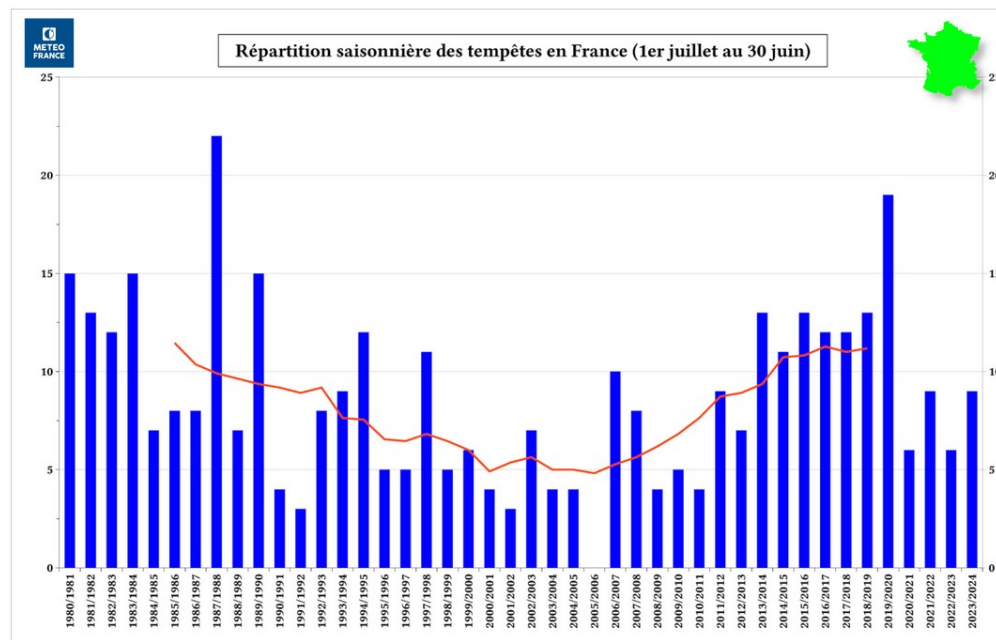
Cumul de la journée la plus pluvieuse à Paris-Montsouris, chaque année de 1901 à 2024

Montsouris

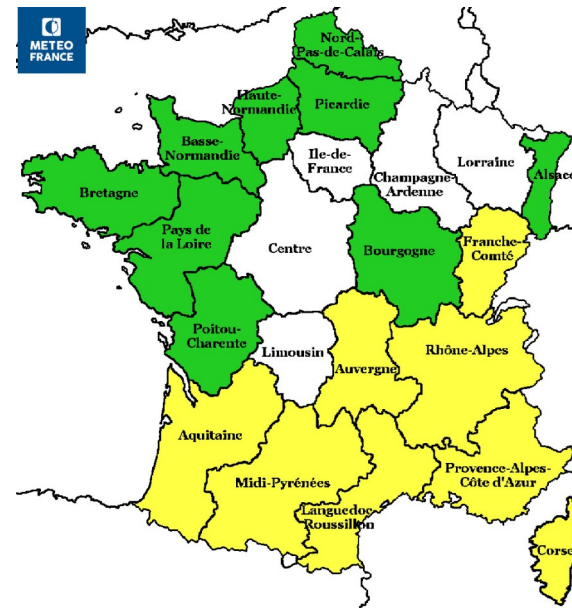


- Des valeurs logiquement très irrégulières, mais une tendance à la hausse statistiquement significative
- On montre de même que les épisodes méditerranéens de fortes précipitations ne sont pas plus fréquents, mais que l'intensité des épisodes les plus forts augmente.

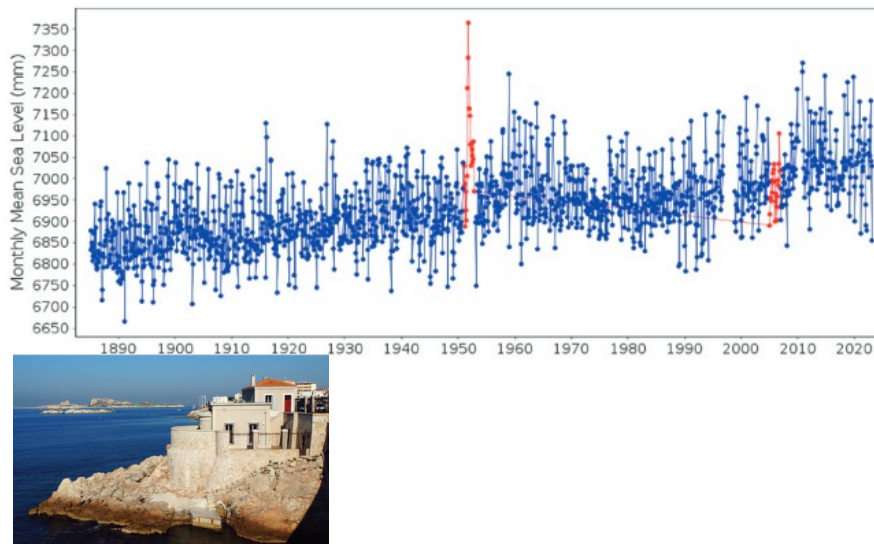
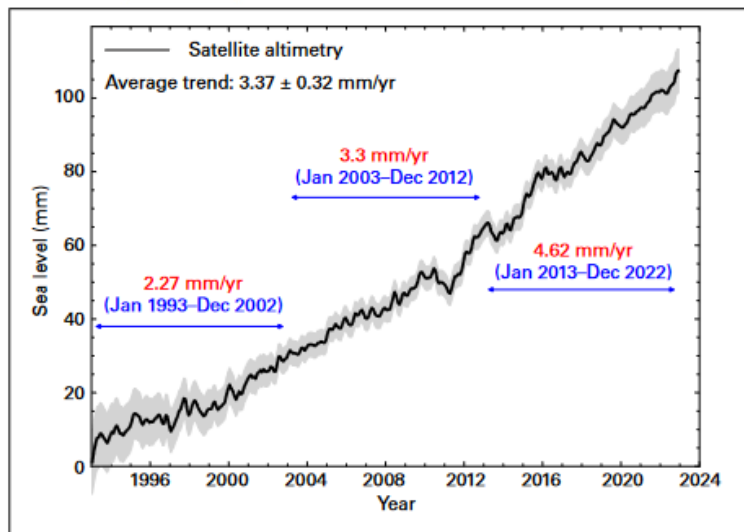
Evolution du vent et des tempêtes



- Une baisse du vent moyen observée sur une partie des stations
- Pas de signal clair observé d'évolution des tempêtes



Hausse du niveau moyen des mers



- A l'échelle globale, le niveau moyen des océans a gagné plus de 20 cm depuis 1901, dont environ 10 cm depuis 30 ans.
- En France, les données du marégraphe de Marseille (référence nationale) montrent une hausse moyenne de 1.4 mm par an depuis sa création en 1885 (hausse estimée à 1.7 mm/an sur la même période à Brest).
- Sur la période 2000-2018, on relève une hausse de 3.6 mm par an.

Exemples températures – précipitations Outre-Mer

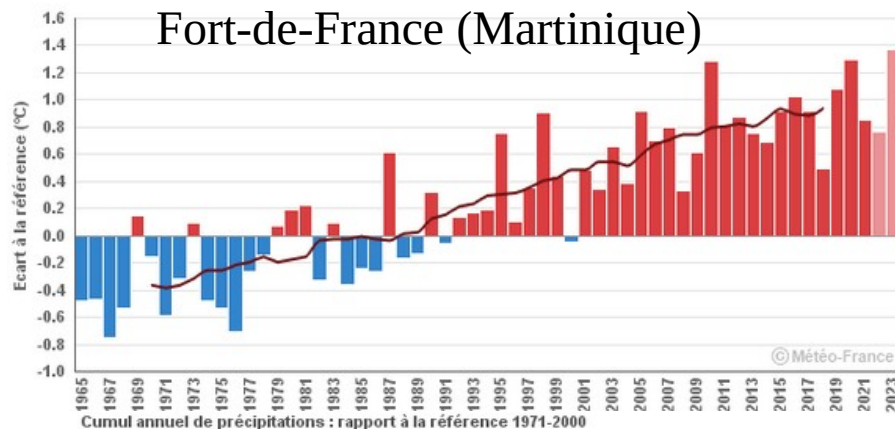
Temp.

Réf. :
moyenne
1971-
2000

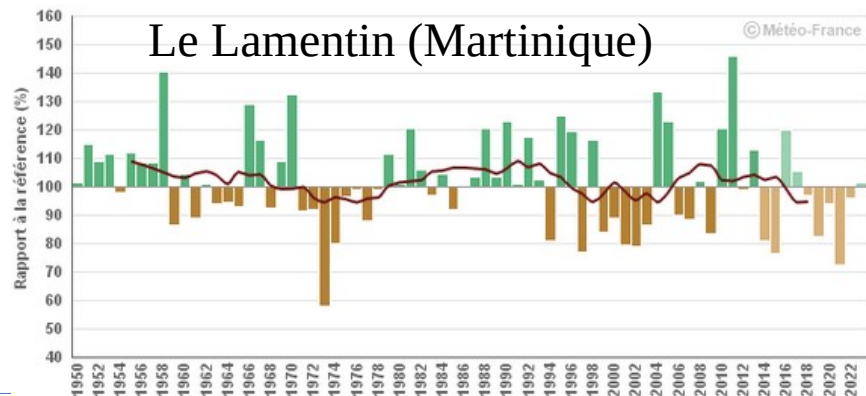
Précip.

Température moyenne annuelle : écart à la référence 1971-2000

Fort-de-France

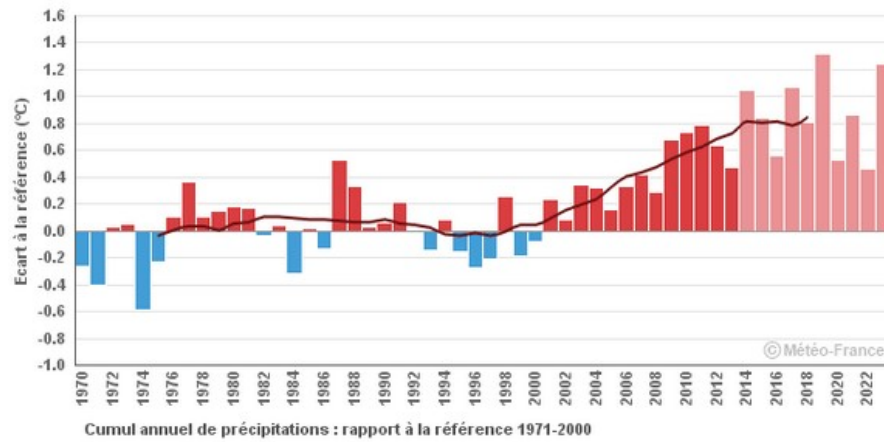


Le Lamentin



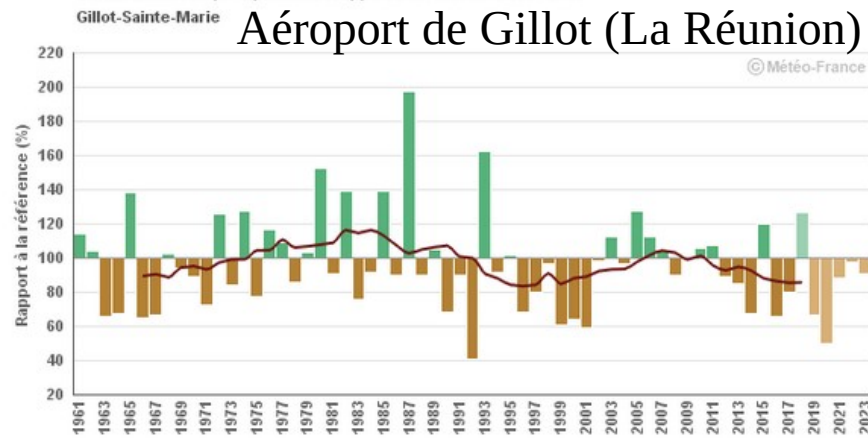
Température moyenne annuelle : écart à la référence 1971-2000

Gillot-Sainte-Marie



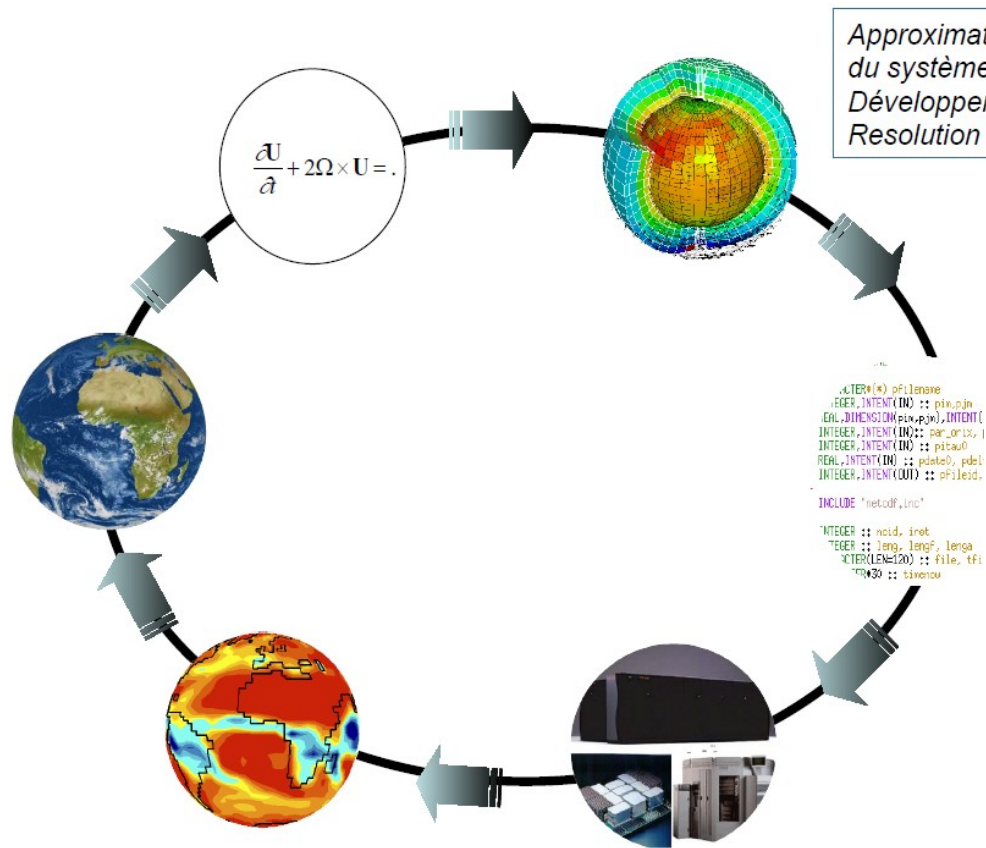
Cumul annuel de précipitations : rapport à la référence 1971-2000

Gillot-Sainte-Marie



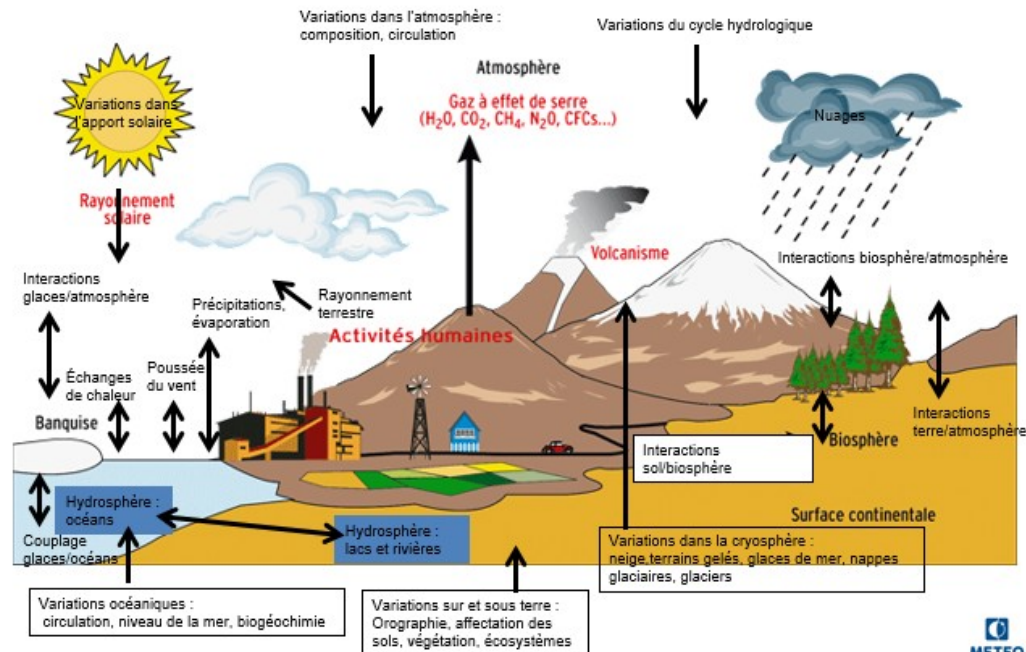
3. La modélisation climatique. Le jeu TRACC 2023.

Modèles de climat



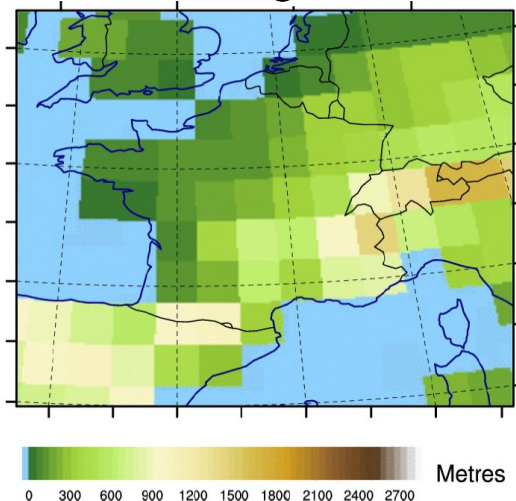
Approximation mathématique (numérique)
du système climatique réel
Développement, Evaluation, Application
Resolution vers Temps de calcul

Le système climatique

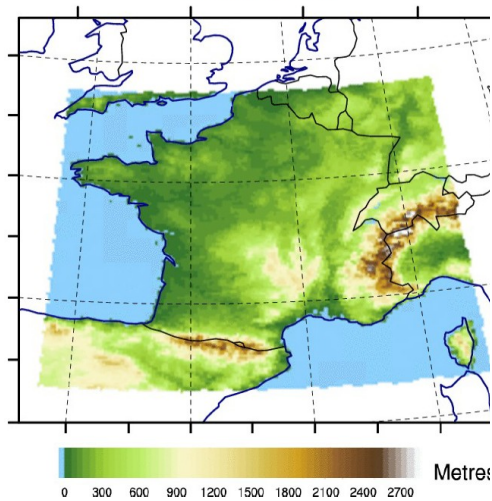


Nécessité d'une descente d'échelle pour représenter les phénomènes régionaux / locaux

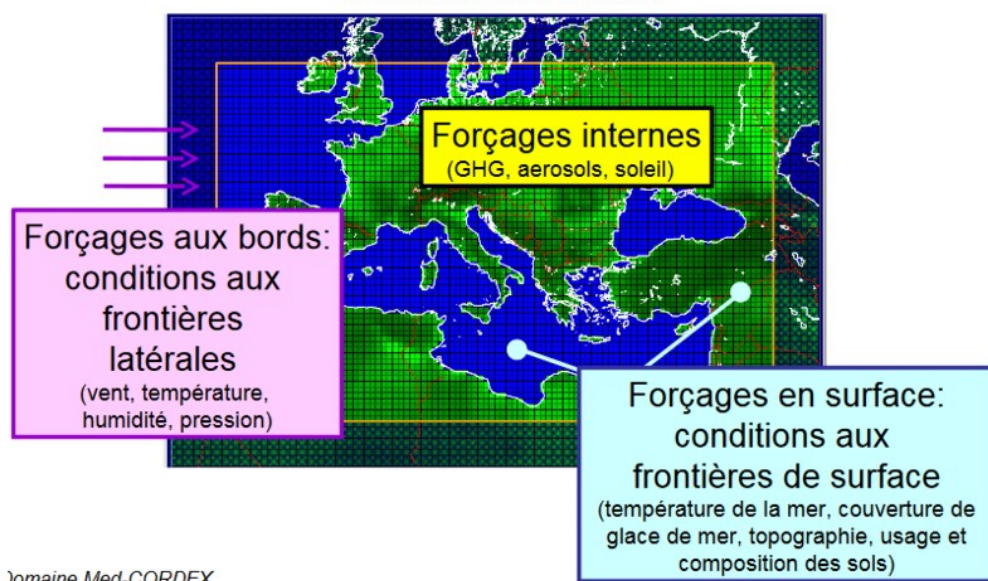
Modèle@150 km



RCM@12 km



Modèle à aire limitée



Domaine Med-CORDEX

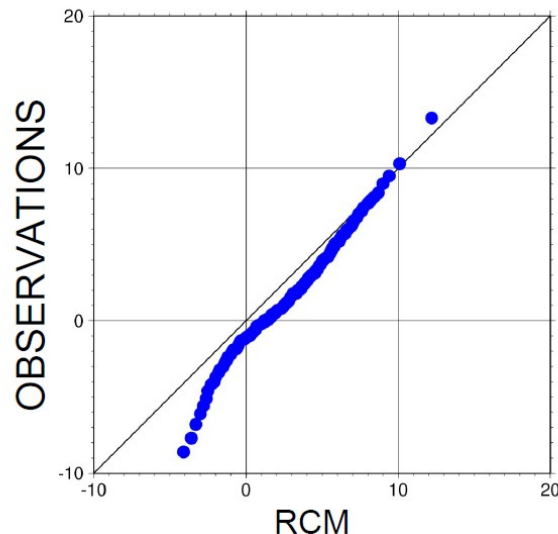
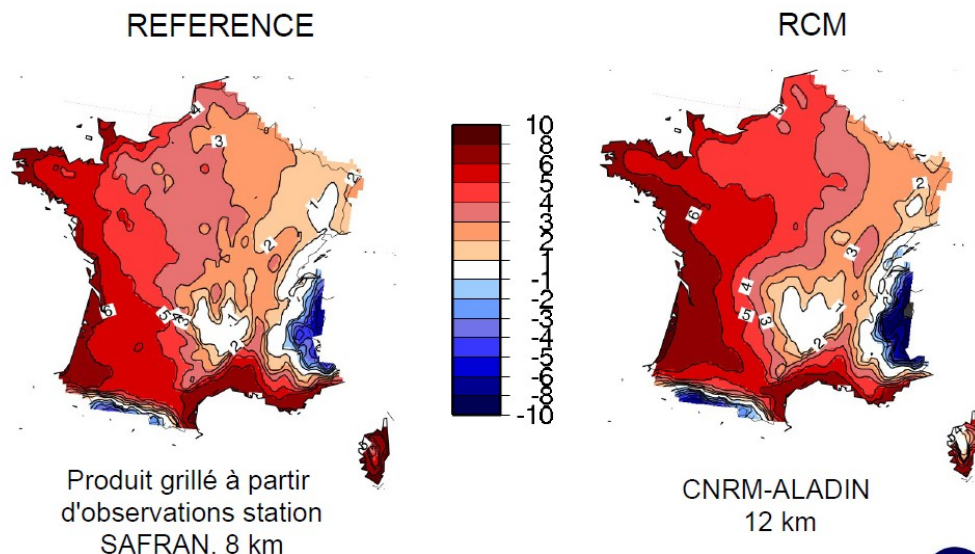
- GCM : modèles globaux de climat
- RCM : modèles régionaux de climat
- La modélisation régionale induit de nouvelles sources d'incertitude

Comparaison aux observations

Température moyenne
(°C, Hiver : DJF, 1961-1990)

Diagramme quantile-quantile pour Paris

Température minimale
(DJF, °C, 1960-1989, données quotidiennes)



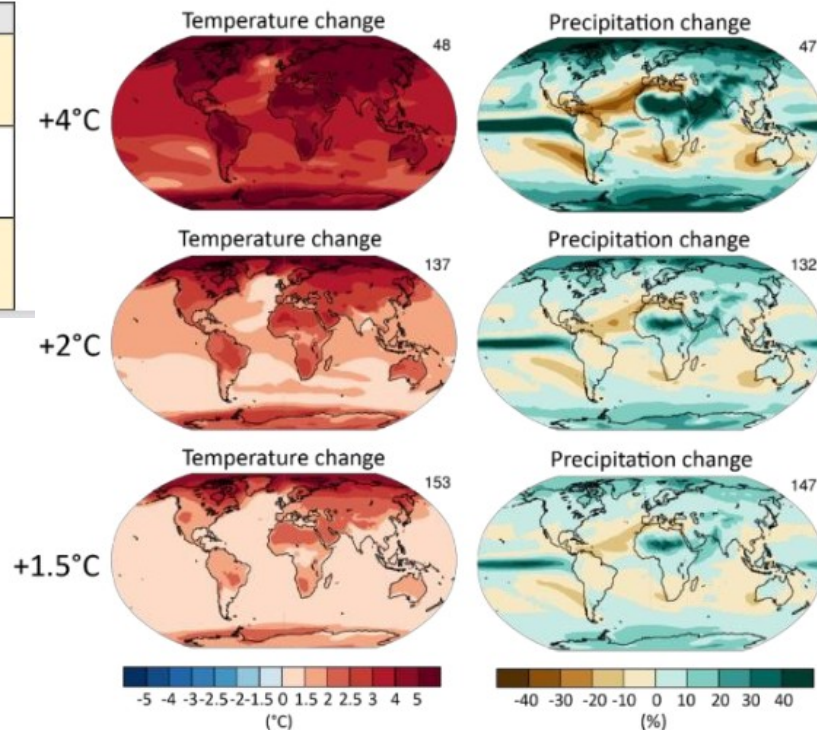
- Les données des RCM disponibles sur DRIAS-Climat et DRIAS-Eau sont corrigées par une méthode de type quantile-quantile sur la période de référence.
- La même correction est appliquée en climat futur (on suppose que les erreurs de modélisation gardent la même structure)

Exemples de résultats issus de modèles globaux

Hausse moyenne de température à la surface du globe selon le scénario

Unités = °C	SSP1-1.9	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
Global : 2021–2040					
Par rapport à 1850–1900	1,5 (1,1 – 2,2)	1,6 (1,1 – 2,2)	1,6 (1,0 – 2,3)	1,6 (1,0 – 2,4)	1,7 (1,2 – 2,4)
Global : 2041–2060					
Par rapport à 1850–1900	1,7 (1,1 – 2,4)	1,9 (1,2 – 2,7)	2,1 (1,5 – 3,0)	2,3 (1,6 – 3,2)	2,6 (1,8 – 3,4)
Global : 2081–2100					
Par rapport à 1850–1900	1,5 (1,0 – 2,2)	2,0 (1,3 – 2,8)	2,9 (2,1 – 4,0)	3,9 (2,8 – 5,5)	4,8 (3,6 – 6,5)

- Sur les figures ci-contre, les changements sont simulés pour un niveau de réchauffement global donné, indépendamment du scénario d'émissions.
- En France, ce mode de représentation va inspirer le principe de la TRACC (Trajectoire de Référence pour l'Adaptation au changement climatique)

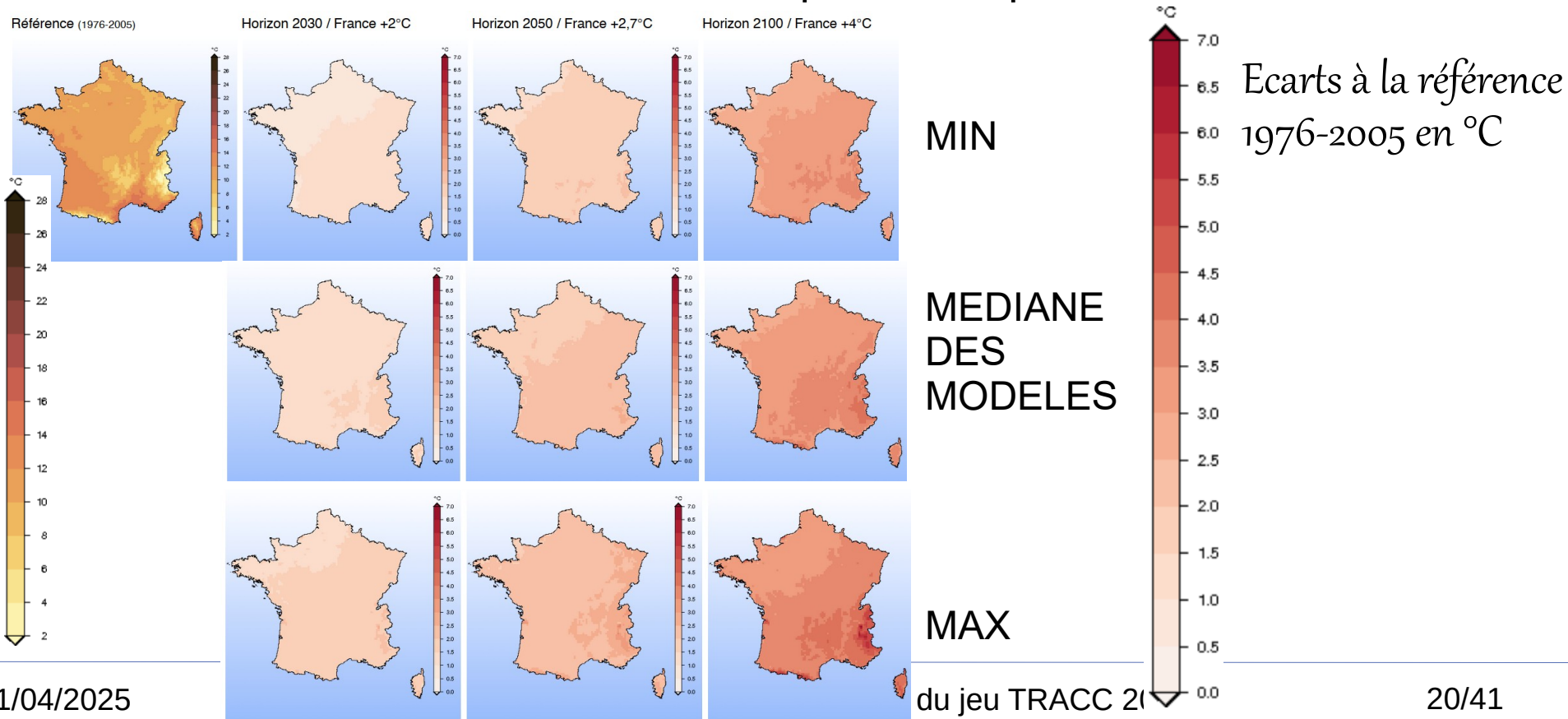


La TRACC (Trajectoire de Référence pour l'Adaptation au Changement Climatique)

- Principe inspiré de l'AR6 du GIEC, où les résultats sont parfois présentés non par scénario, mais à un niveau de réchauffement global donné (ex. dans un monde à **+2°C**, la référence étant toujours la période 1851-1900).
- Trois niveaux de réchauffement global sélectionnés : **+1.5 °C**, **+2°C** (niveaux évoqués dans l'accord de Paris) et **+3 °C** (estimation pour 2100 qui correspond aux engagements de réduction d'émission de GES pris par les Etats).
- Une étude utilisant la contrainte des modélisations par les observations permet de déterminer les niveaux de réchauffement équivalents pour la France : **+2°C**, **+2.7°C** et **+4°C** par rapport à 1901-1930.
- Sélection de 17 simulations climatiques (issues de DRIAS 2020 et EXPLORE 2) constituant le jeu TRACC 2023. Les simulations RCP 8.5 sont utilisées (pour avoir un réchauffement suffisant).
- Pour chaque simulation, les trois horizons de la TRACC correspondent aux périodes de 20 ans centrées sur la date où les niveaux de réchauffement sélectionnés sur la France sont atteints.
- Pour simplifier, on parle d'horizon 2030, 2050 et 2100 (ces dates doivent se comprendre comme des cibles pour l'adaptation).

La TRACC (Trajectoire de Référence pour l'Adaptation au Changement Climatique)

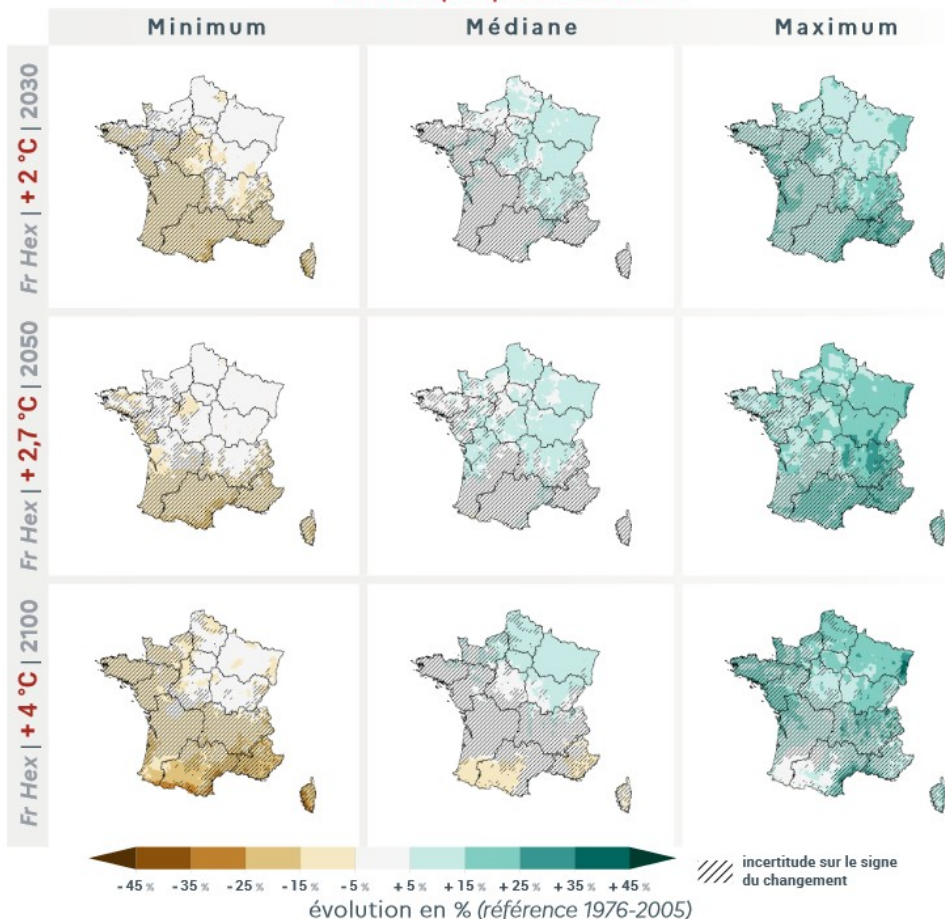
- Remarque** : la période de référence du jeu TRACC 2023 est 1976-2005. L'écart en France à 1851-1900 est pour cette période de **0.6°C**.



4. Projections du jeu TRACC 2023 sur la France

Evolution des cumuls annuels de précipitations

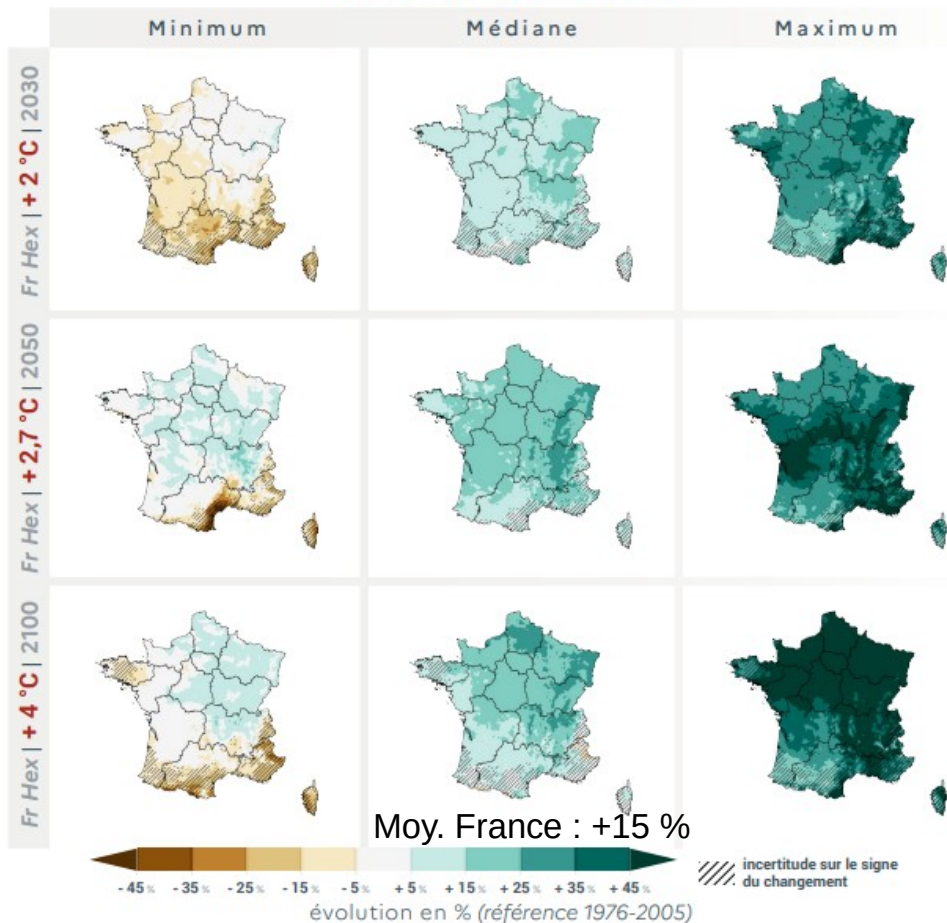
Cumul des précipitations de l'année



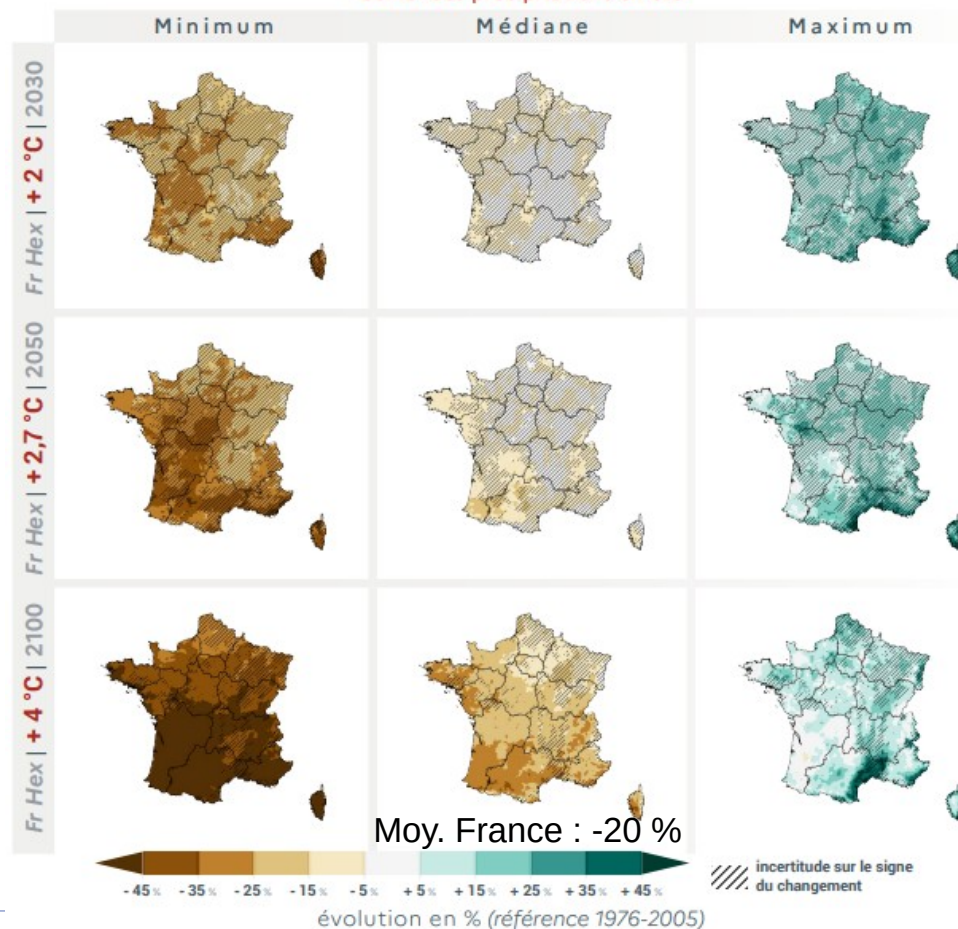
- Une incertitude modèle plus marquée (zones hachurées notamment) : certains modèles proposent une baisse des cumuls, d'autres une hausse.
- La médiane des modèles propose une légère hausse sur la plupart des régions jusqu'en milieu de siècle, notamment sur le quart nord-est, puis une baisse majoritaire sur la moitié sud.

Cumuls de précipitations en hiver, en été

Cumul des précipitations en hiver



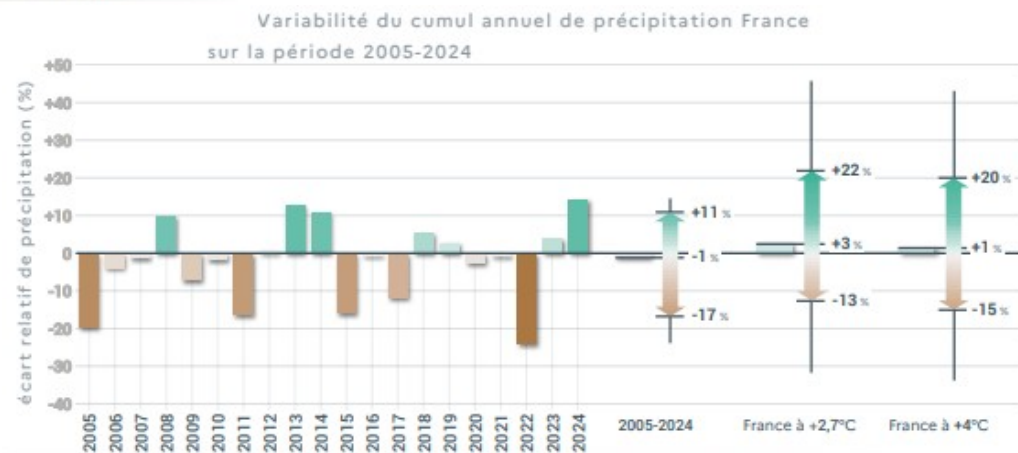
Cumul des précipitations en été



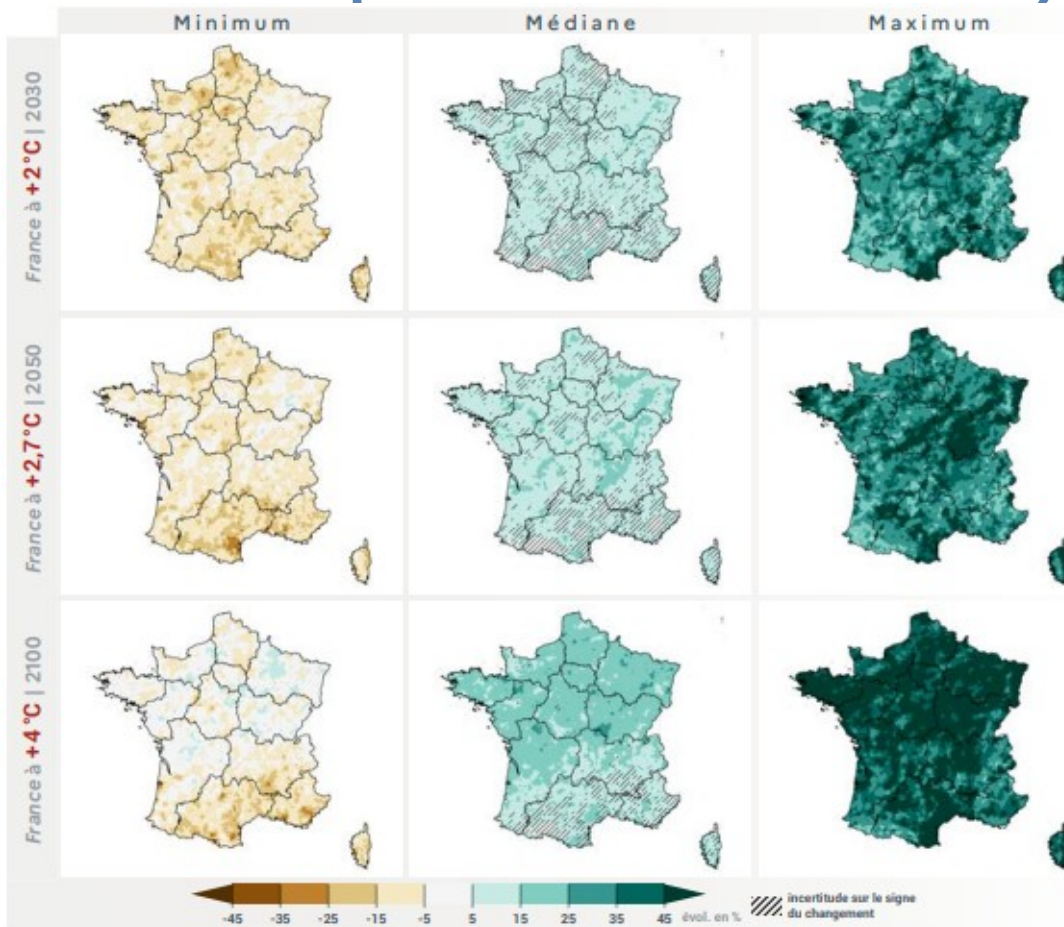
Types de comportement des simulations vis-à-vis des cumuls de précipitations – Variabilité annuelle



- Une année aussi sèche que 2022 reste peu fréquente mais possible dans les simulations.
- Une année humide comme 2024 reste humide mais devient plus courante.

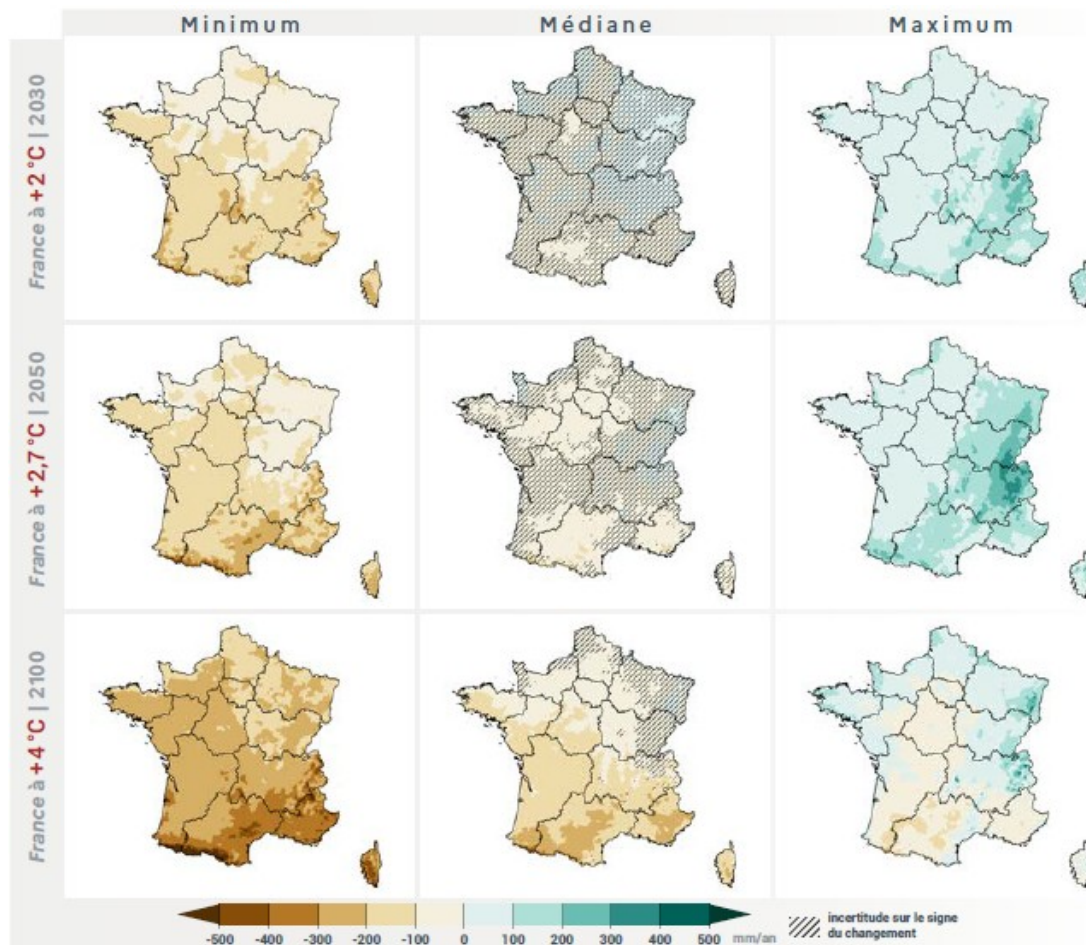


Evolution des pluies intenses (pluies maximales quotidiennes annuelles)



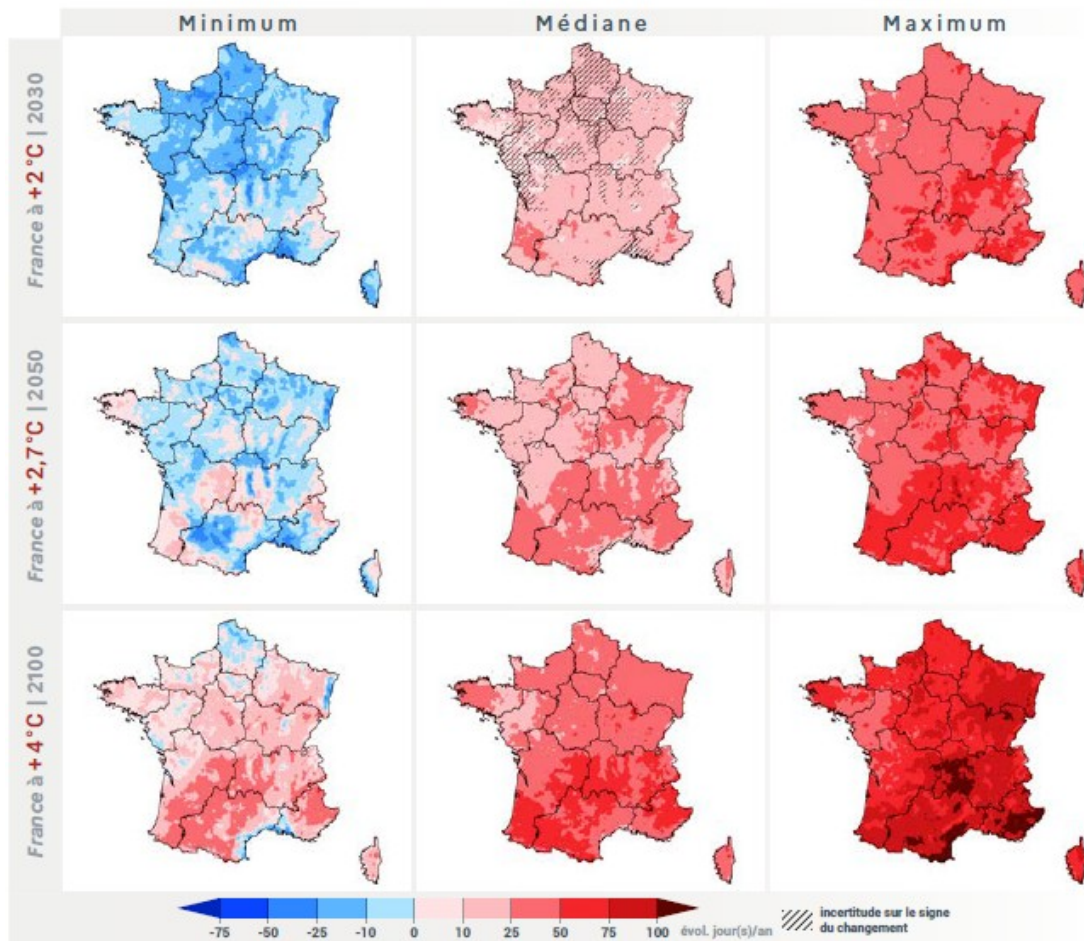
- **France à +2°C : +9 % [+6%;+14%]**
- **France à +2,7°C : +11 % [+4%; +14%]**
- **France à +4°C : +15 % [+10%; +30%]**
- Hausses plus fortes sur la moitié nord (+20 %, nettement plus dans certaines simulations), où le consensus entre modèles est meilleur.
- L'évolution des pluies intenses sur des pas de temps plus courts nécessite des études complémentaires.

Evolution du bilan hydrique (précipitations - ETP)



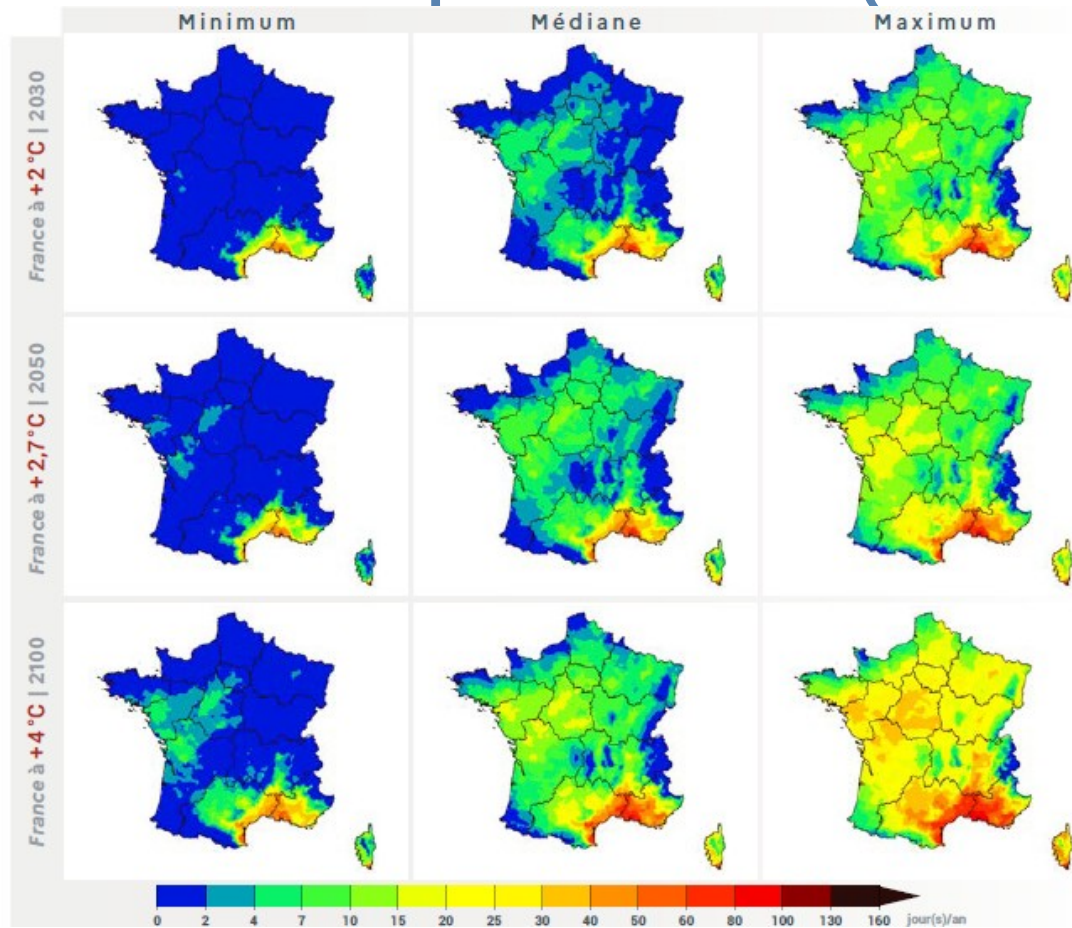
- **France à +2°C** : -2 mm/an [-86 mm ; +46 mm]
- **France à +2,7°C** : -45 mm [-96 mm ; +81 mm]
- **France à +4°C** : -116 mm [-216 mm ; -40 mm]
- Des Pyrénées à la Méditerranée, la baisse à l'horizon 2100 dépasse parfois les 200 mm (soit de l'ordre d'un tiers du cumul annuel de précipitations).

Evolution du nombre de jours avec sol sec ($SWI < 0,4$)

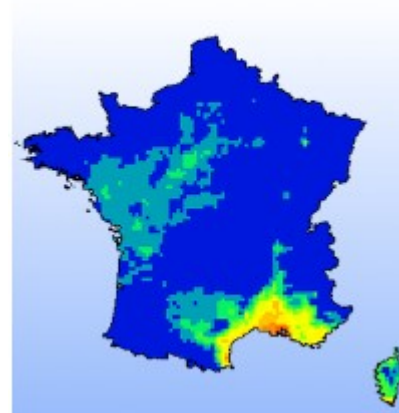


- **France à +2°C : +13 j/an [+2 j ; +33 j]**
- **France à +2,7°C : +24 j [+2 j ; +41 j]**
- **France à +4°C : +39 j [+23 j ; +68 j]**
- Sur la moitié sud, à l'horizon 2100, on approche souvent les deux mois de stress hydrique en plus (en moyenne sur 20 ans).

Evolution du nombre de jours avec risque de feux d'espaces naturel (IFM ≥ 40)

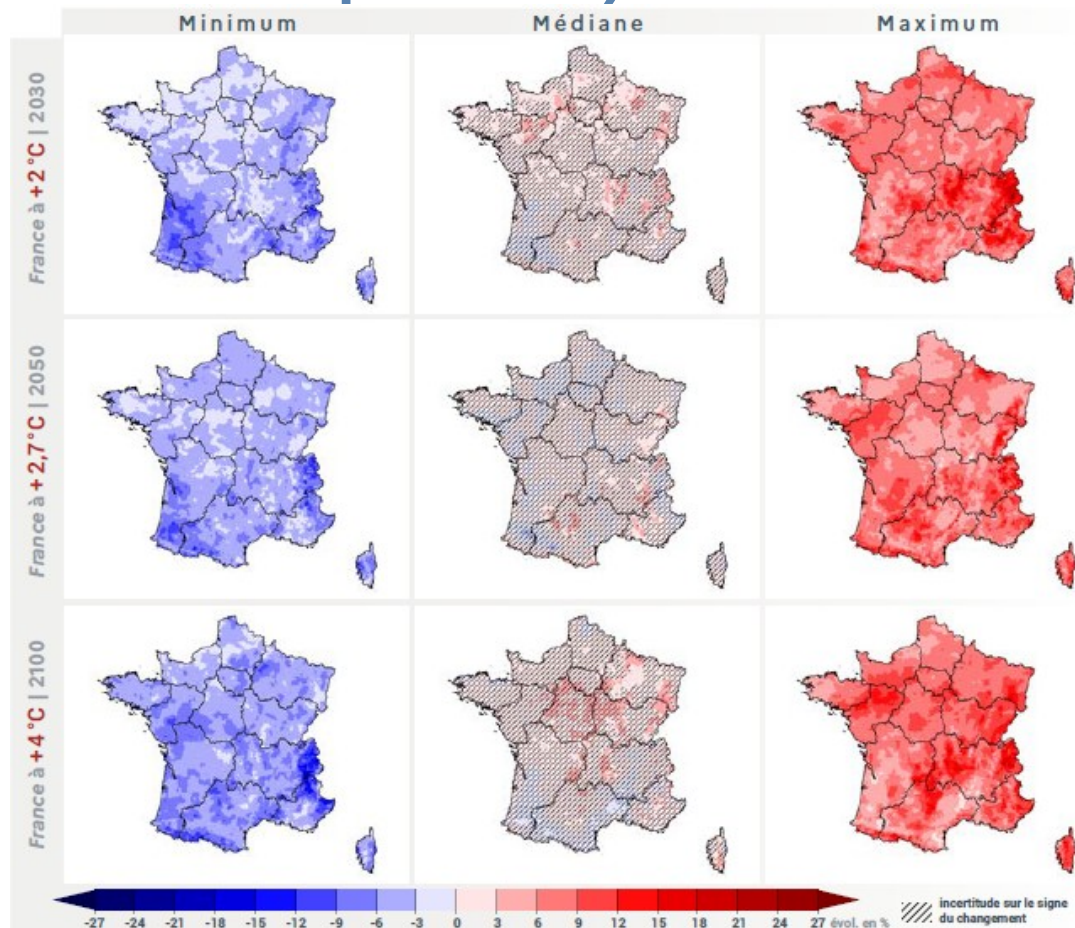


Référence (1976-2005)



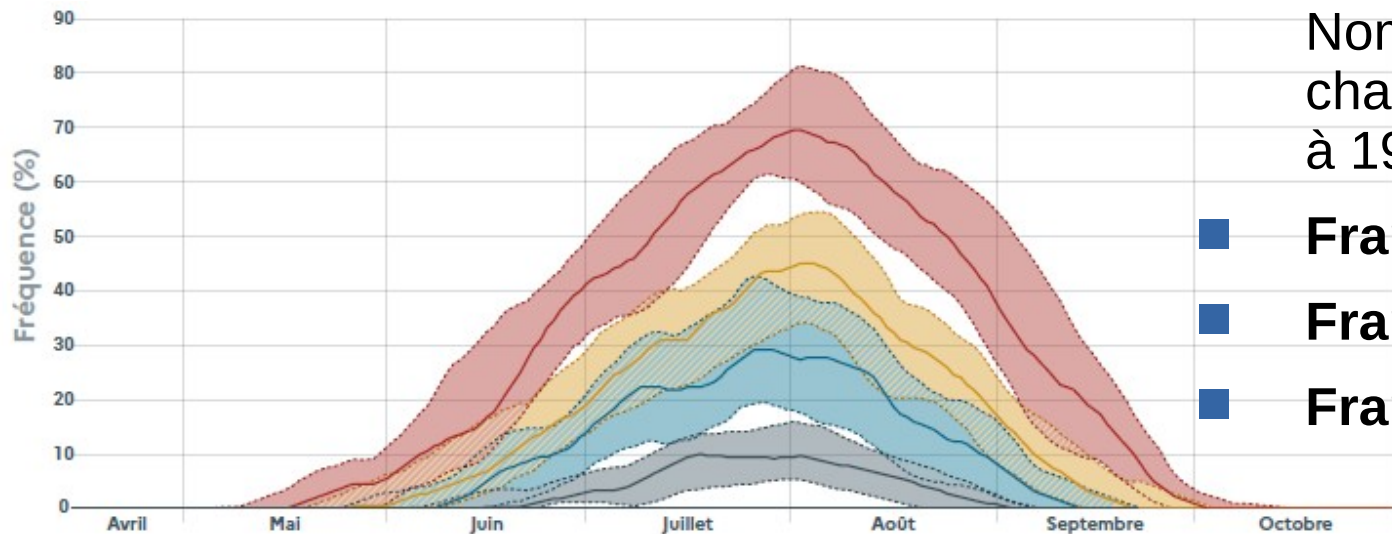
- Forte évolution sur les régions méditerranéennes (localement plus de 80 jours par an).
- Le Centre-Ouest s'approche à l'horizon 2100 des niveaux méditerranéens actuels.

Evolution des vents forts (max annuel de vent moyen quotidien)



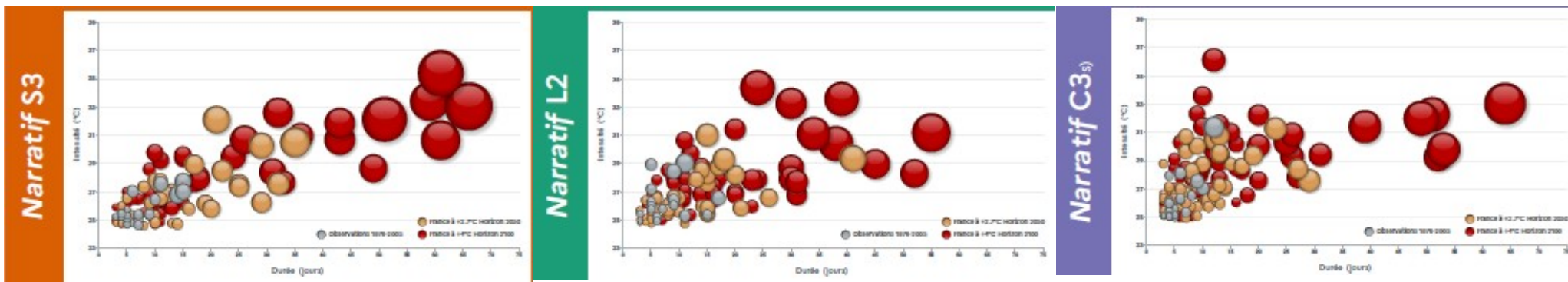
- Pas de signal sur l'évolution de l'intensité des vents forts tels que connus lors des épisodes de tempêtes (rafales de vent ponctuelles sous orage non représentées par cet indicateur).
- **GIEC** : dans un monde à +2 degrés ou plus, confiance moyenne dans une légère hausse d'intensité des tempêtes (Europe du Nord, du Centre et de l'Ouest). Sur le bassin méditerranéen, baisse de fréquence mais hausse d'intensité.

Evolution des vagues de chaleur



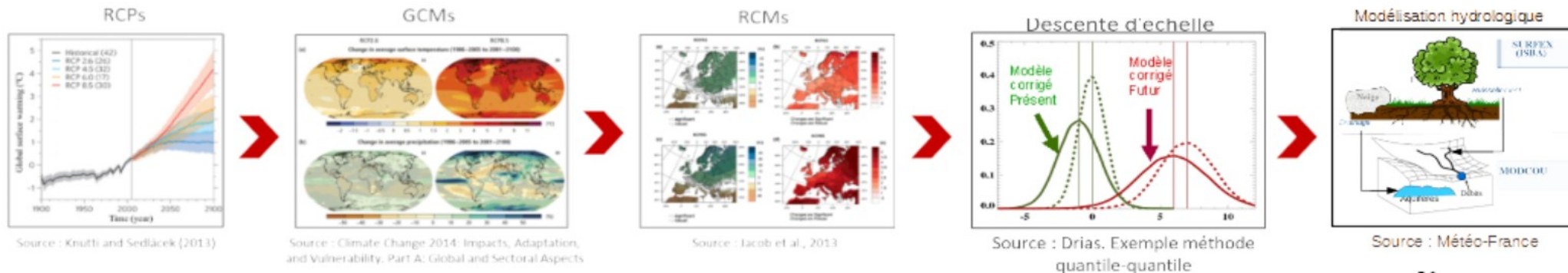
Nombre de jours de vague de chaleur en France par rapport à 1976-2005 :

- France à +2°C : x3 [x2 ; x5]
- France à +2,7°C : x5 [x4 ; x7]
- France à +4°C : x10 [x7 ; x12]



5. Quelques éléments sur les débits (projet EXPLORE 2)

Modélisation hydroclimatique – site DRIAS-Eau

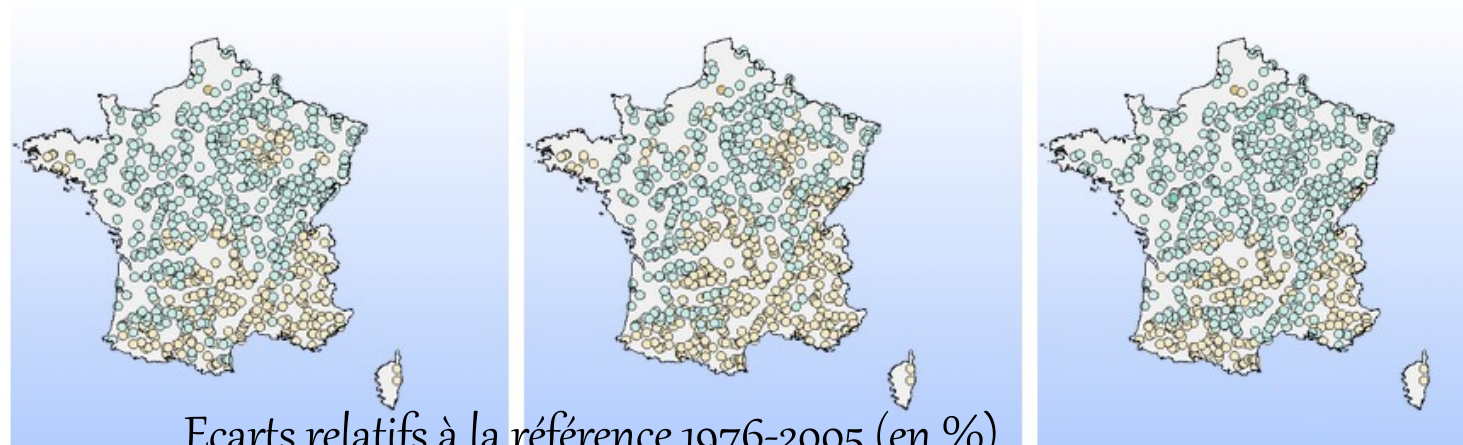


Ecarts des débits moyens, RCP 4.5, médiane de l'ensemble DRIAS 2020 - SIM2

Horizon proche (2021-2050)

Horizon moyen (2041-2070)

Horizon lointain (2071-2100)

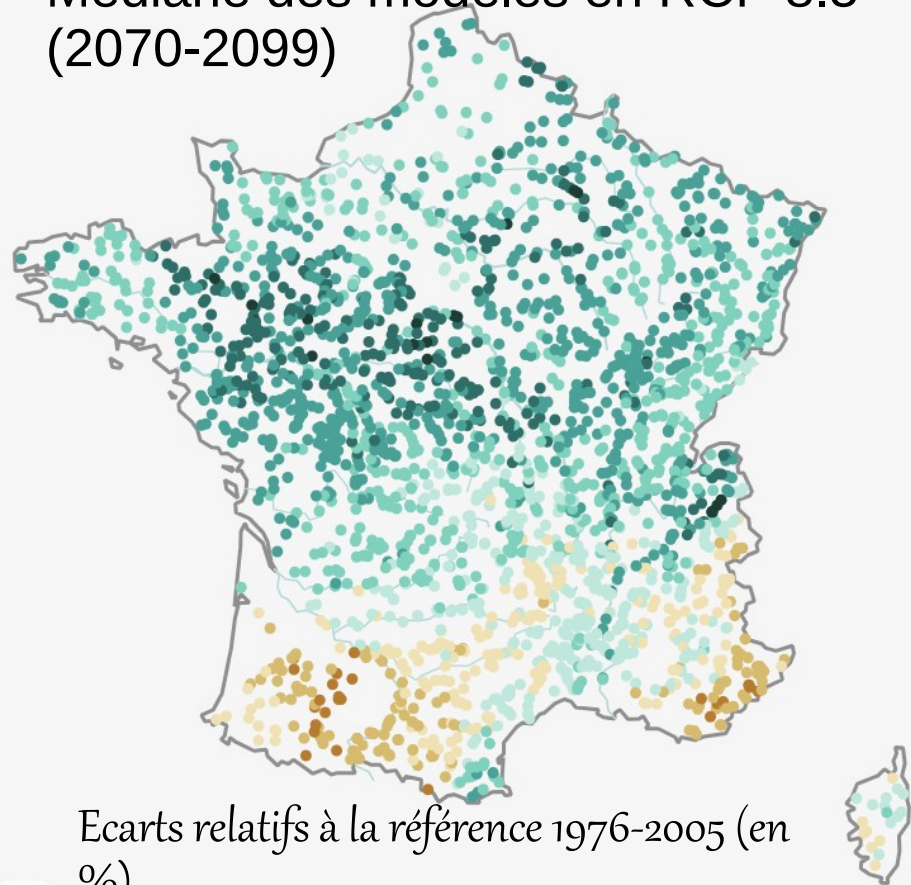


Ecarts relatifs à la référence 1976-2005 (en %)

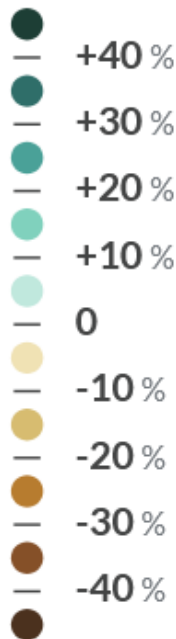


EXPLORE 2 : évolution des débits max annuels

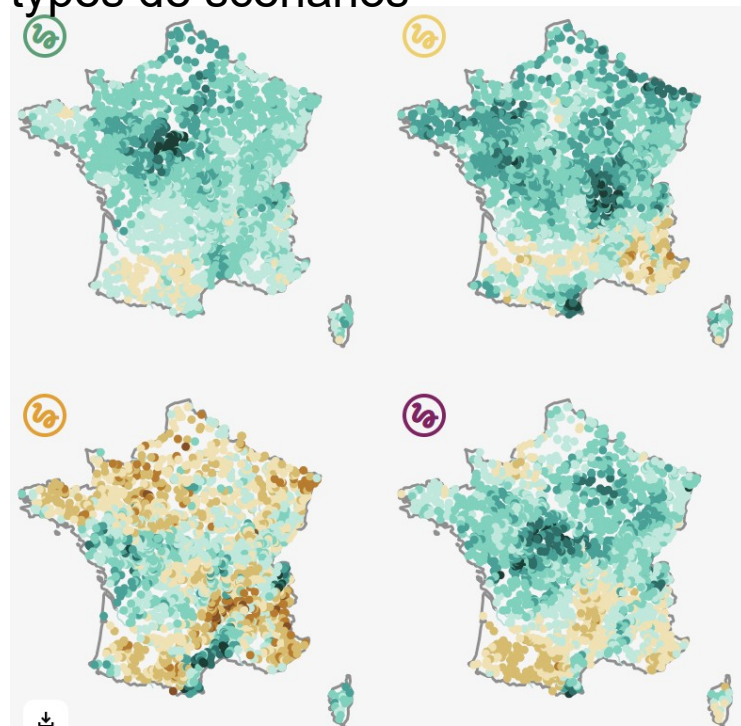
Médiane des modèles en RCP 8.5
(2070-2099)



Écarts relatifs à la référence 1976-2005 (en %)



Répartition des simulations en 4 types de scénarios



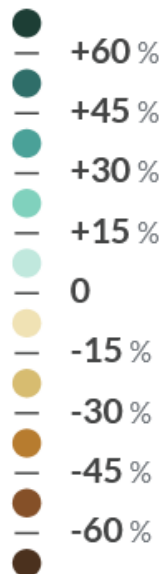
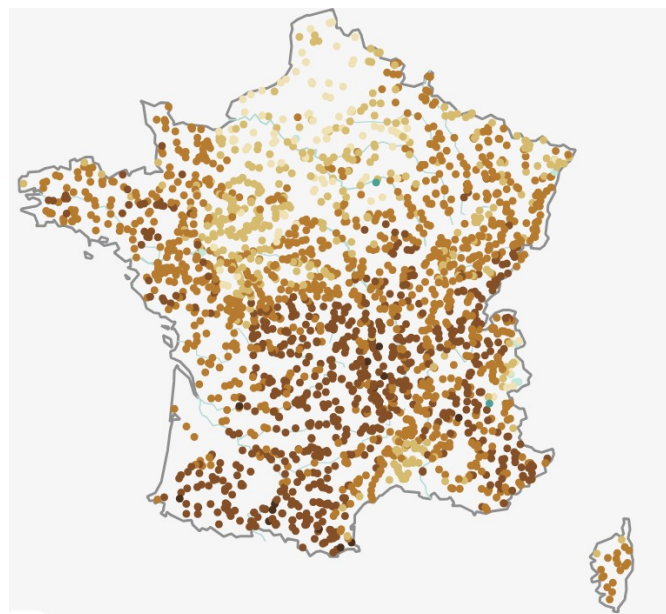
VERT Réchauffement marqué et augmentation des précipitations

JAUNE Changements futurs relativement peu marqués

ORANGE Fort réchauffement et fort assèchement en été (et en annuel)

VIOLET Fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations

EXPLORE 2 : évolution de la moyenne min sur 10 j des débits, et de la durée des basses eaux estivales



Ecart relatif à la référence 1976-2005 (en %)

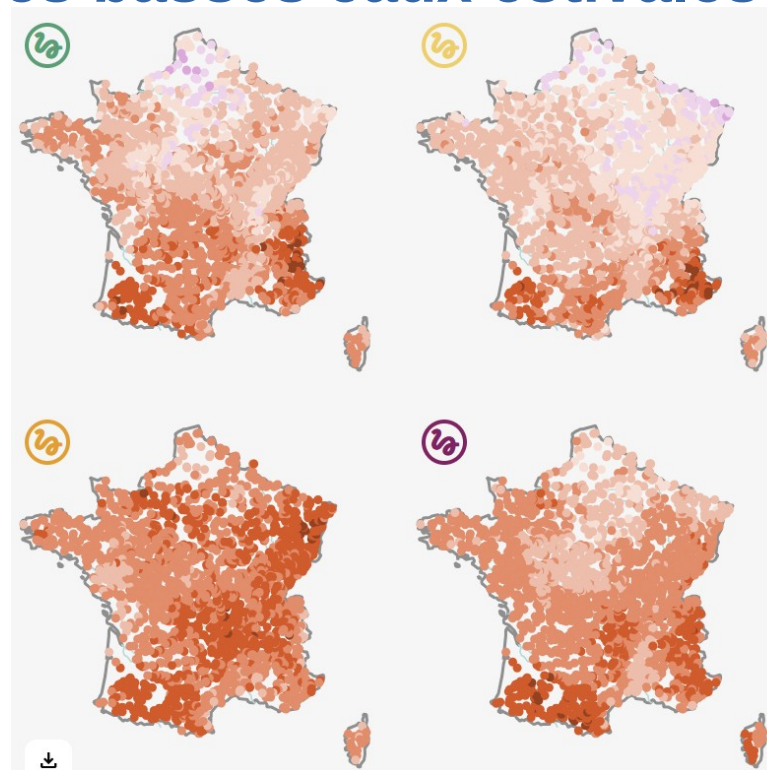
2070-2099,
RCP 8.5,
Médiane

VERT Réchauffement marqué et augmentation des précipitations

JAUNE Changements futurs relativement peu marqués

ORANGE Fort réchauffement et fort assèchement en été (et en annuel)

VIOLET Fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations

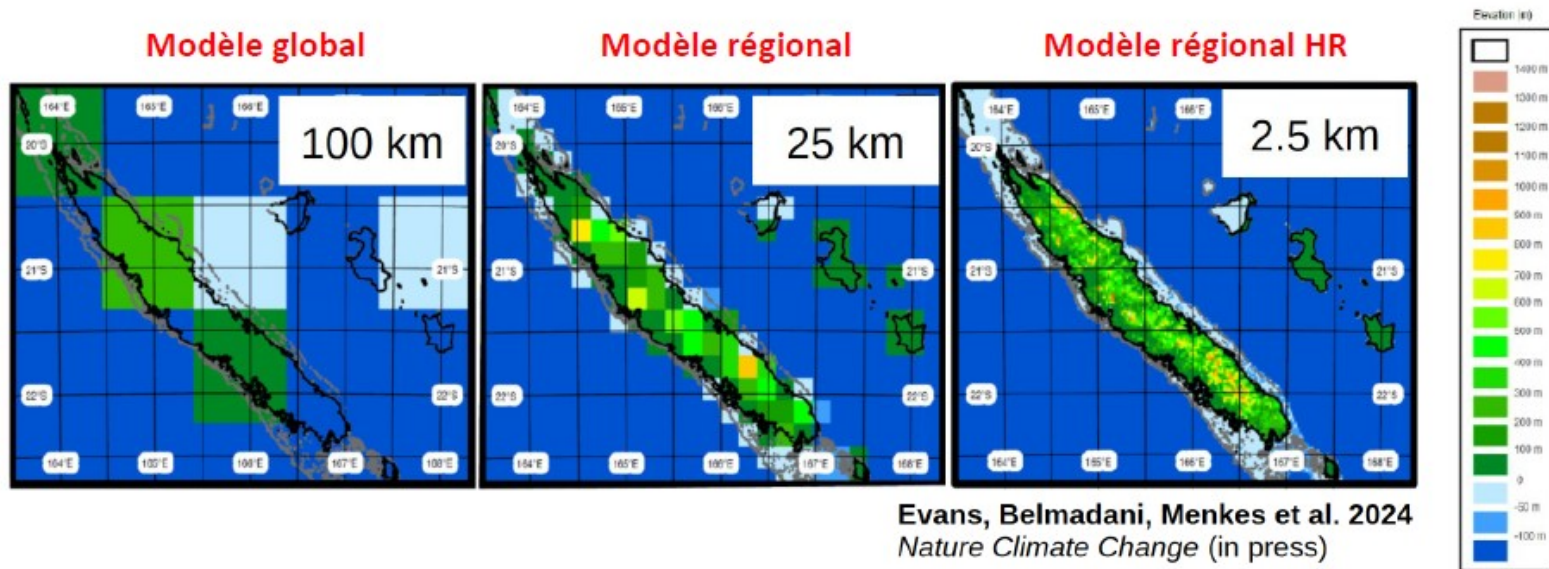


Ecart à la référence 1976-2005 (en jours)

6. Les projections climatiques Outre-Mer

Projections climatiques Outre-Mer (1/2)

Représentation du relief de la Nouvelle-Calédonie



- Descente d'échelle dynamique ou statistique nécessaire : certaines îles « n'existent pas » dans les simulations globales.
- Données existantes à Météo-France :
 - **La Réunion** : projet BRIO (Météo-France, COI, AFD): RCM Aladin à 12 km de résolution + descente d'échelle statistique à partir de GCM CMIP 6. Le jeu de données BRIO 2024 est disponible dans DRIAS-Climat.

Projections climatiques Outre-Mer (2/2)

- **Antilles** : projet C3AF (2019, Université des Antilles, U. Montpellier 3, Météo-France, BRGM). Utilisation d'un modèle atmosphérique global à grille variable, 15 à 20 km de résolution sur les Antilles. 5 simulations (5 forçages différents en température de surface de la mer). Résultats disponibles sur DRIAS-Climat.
- **Guyane** : projet Guyaclimat (2022, BRGM, Météo-France, AFD, ADEME, partenaires locaux). Pour les paramètres météorologiques, sélection de modèles globaux CMIP 6, débiaisage et descente d'échelle statistique.

■ **Autres territoires** : Le projet SOCLE-OM vise à fournir des jeux de données de référence sur certaines îles de Polynésie, les Antilles, la Guyane, Mayotte, La Réunion, la Nouvelle-Calédonie. Mise en ligne dans DRIAS-Climat envisagée à partir de fin 2025.

Chaîne de modélisation dans la région Pacifique

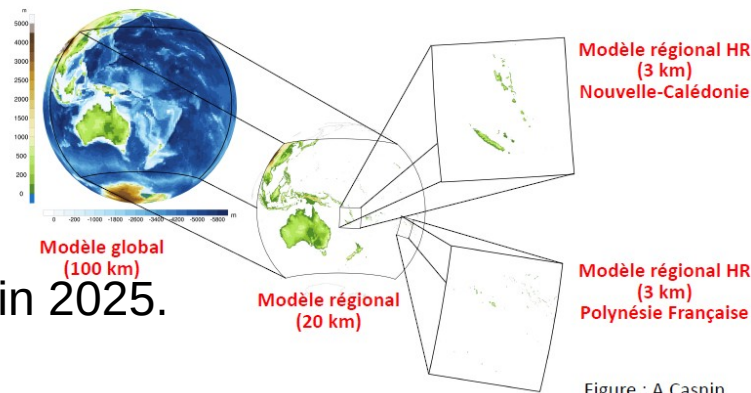
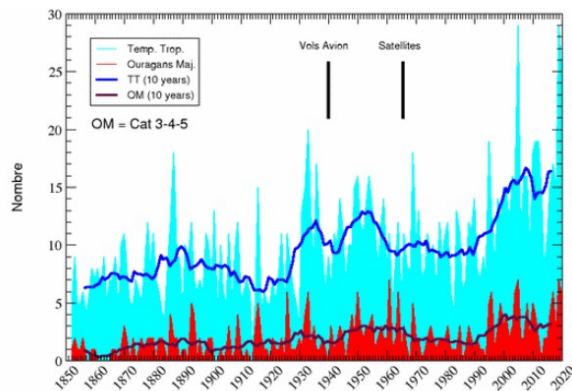


Figure : A.Casnin

Changement climatique et cyclones



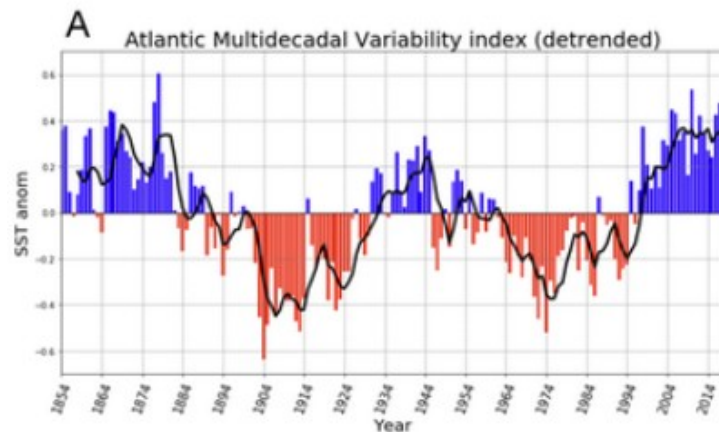
Au cours des 50 dernières années :

- **Pas de tendance systématique observée** (nombre, intensité).
- **Forte variabilité naturelle** décennale.
- **Augmentation de la proportion** de cyclones intenses

Dans les 100 prochaines années :

Projections encore très **incertaines** :

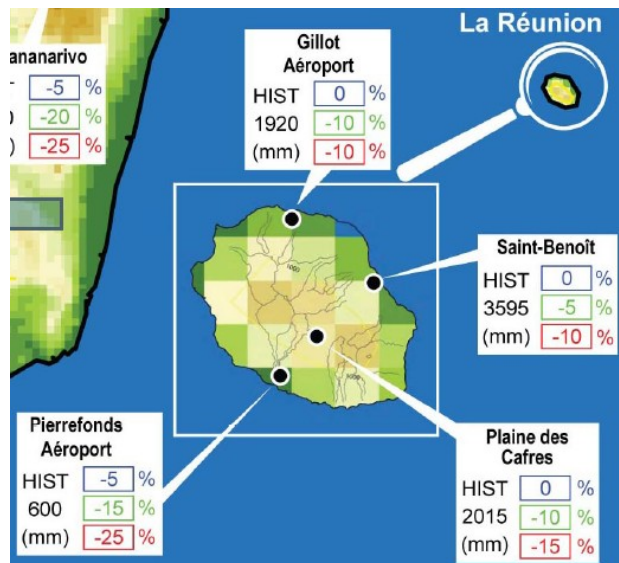
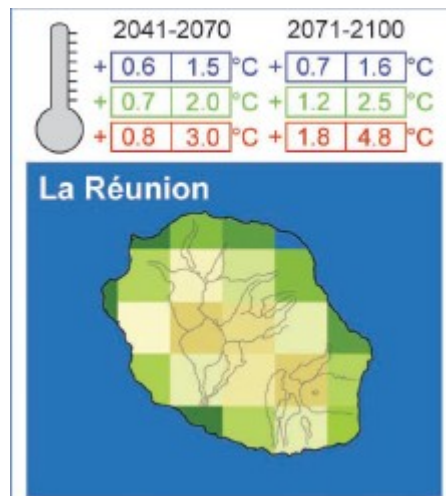
- **Peu** de modifications dans leur nombre (plutôt à la baisse)
- Augmentation de **l'intensité**
- Augmentation de la **proportion de cyclones intenses**
- **Accroissement** des **précipitations** associées
- **Modifications de leurs trajectoires** selon la distribution du réchauffement océanique



Source : The Climate Scientist



La Réunion – projet BRIO



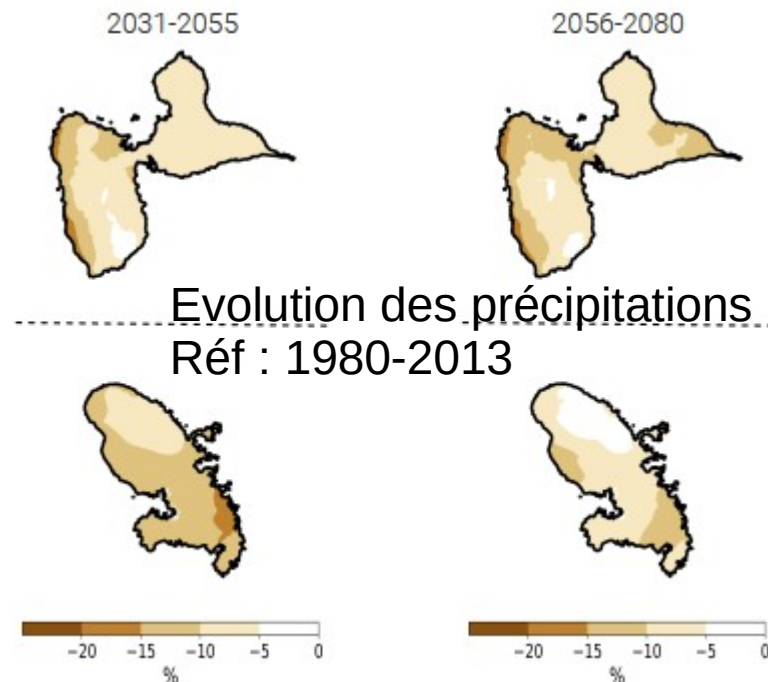
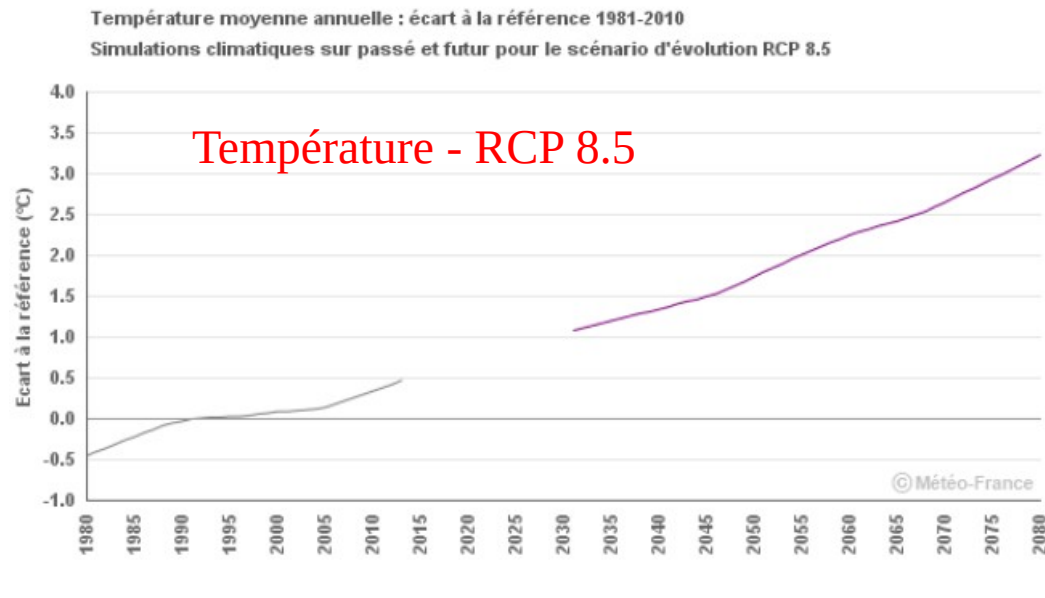
Evolution des précipitations
en fin de siècle

SSP1 – 2.6
SSP2 – 4.5
SSP5 – 8.5

Référence : 1981-2010

- Hausse de la température dans tous les scénarios, plus forte en été.
- En scénario pessimiste, plus de 31°C de température maxi la moitié de l'année en fin de siècle (contre une dizaine de jours dans la période de référence).
- Baisse des cumuls annuels de précipitations plus probable qu'une hausse. Baisse plus marquée au 2nd semestre (allongement de la saison sèche).
- Baisse du nombre total de systèmes dépressionnaires tropicaux, mais le nombre de systèmes intenses ou très intenses est constant ou en hausse.

Antilles – projet C3AF



- Hausse de la température, pouvant dépasser en scénario pessimiste $+1,5^{\circ}\text{C}$ vers 2050 et $+3^{\circ}\text{C}$ vers 2080 (référence : 1980-2013).
- Possible baisse des précipitations dès 2031-2055.
- Les résultats doivent être consolidés par l'utilisation d'autres modèles globaux.

Quelques références

- Rapports du GIEC : <https://www.ipcc.ch/>
- Global Carbon Budget : <https://globalcarbonbudget.org/>
- Climat HD : <https://meteofrance.com/climathd>
- DRIAS-Climat : <https://www.drias-climat.fr/>
- DRIAS-Eau : <https://www.drias-eau.fr/>
- Portail MEANDRE de l'INRAE : <https://meandre.explore2.inrae.fr/>
- CLIMADIAG Commune : <https://meteofrance.com/climadiag-commune>
- CLIMADIAG Entreprise : <https://meteofrance.com/climadiag-entreprise>
- Rapport TRACC partie 1 : <https://hal.science/hal-04797481>
- Rapport TRACC partie 2 : <https://hal.science/hal-04991790>
- Rapport BRIO : <https://hal.science/hal-03966983>
- Rapport Guyaclimat : <http://ficheinfoterre.brgm.fr/document/RP-72111-FR>