



Le projet LIFE Eau&Climat (LIFE19 GIC/FR/001259)
a reçu un financement du programme LIFE de l'Union européenne.

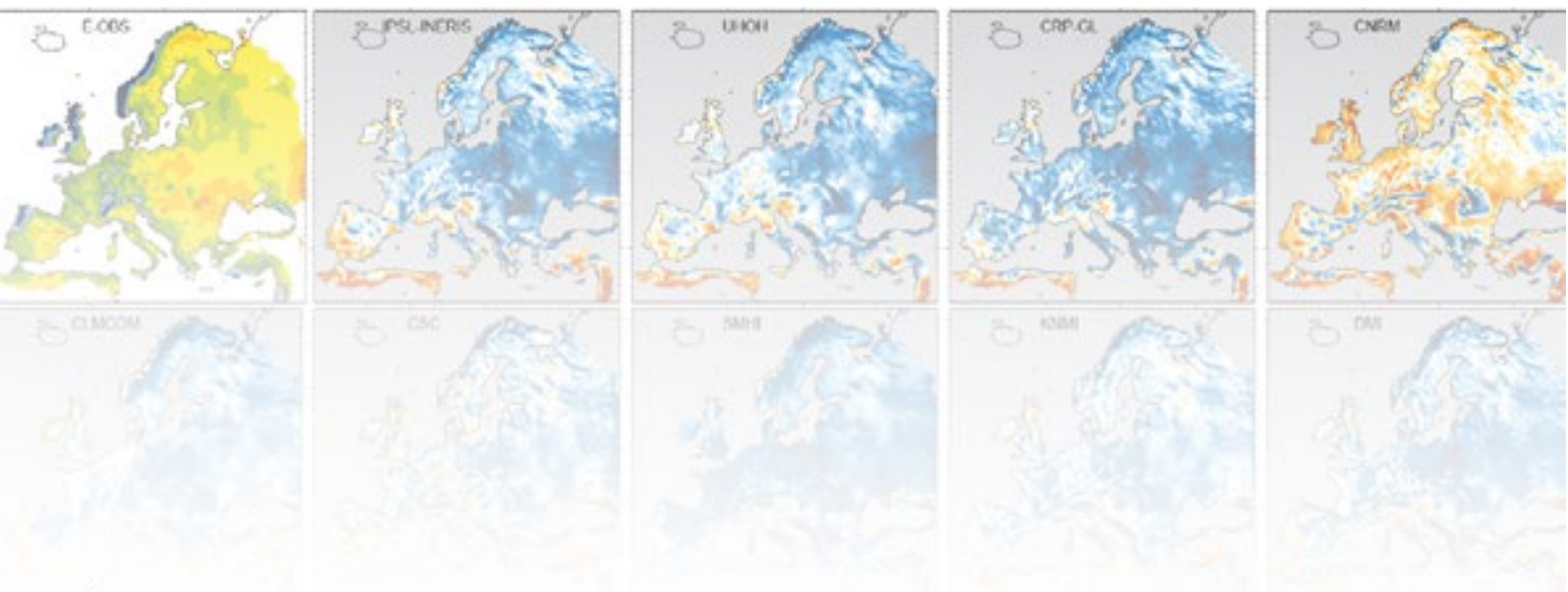


CHANGEMENT CLIMATIQUE

«Les mots pour le dire»

DOCUMENT DE SYNTHÈSE

Février 2024



Auteurs

Amélie Ringeade (SMAVD)- Jean-Philippe Vidal (INRAE)



Avec le soutien
financier de :



Sommaire

Présentation « Les mots pour le dire » par Jean-Philippe Vidal	1
1. Vous avez dit RCP 8.5 ? C'est quoi un scénario d'émission de gaz à effet de serre ?	2
2. Les GCM, des grosses machines pour simuler le climat futur, mais pas que... ..	5
3. Quel a été le climat passé de la planète ? Est-on capable de le reproduire avec les modèles ?.....	8
4. Le changement climatique à l'échelle plus locale : des contraintes en plus ?	11
5. Comment représenter les projections climatiques ?	13
6. Tester les modèles, les comparer et produire des résultats	15
7. À l'échelle régionale, comment sont élaborées les projections climatiques ?	17
8. Qu'est-ce que la correction de biais ?.....	21

Présentation « Les mots pour le dire » par Jean-Philippe Vidal

Dans le cadre du projet LIFE Eau&Climat, Jean-Philippe Vidal, hydroclimatologue à INRAE, a proposé une formation aux acteurs du projet pour mieux comprendre le changement climatique. Les 8 sessions de formation ayant eu lieu au printemps 2021 ont été synthétisées par le SMAVD¹ pour permettre à d'autres acteurs travaillant autour des thématiques de ressource en eau et de changement climatique de pouvoir s'approprier ces questions.

L'ordre des fiches permet d'aborder des notions de plus en plus complexes. Elles peuvent être lues indépendamment les unes des autres, mais certains éléments de compréhension des premières fiches peuvent être nécessaires pour appréhender les suivantes.

Les deux premières fiches abordent les notions essentielles du changement climatique. La première traite des gaz à effet de serre et des scénarios d'émissions et la deuxième présente ce qu'est un modèle climatique global.

Les fiches 3 et 4 abordent la notion de variabilité climatique à l'échelle globale puis régionale. Elles sont importantes pour comprendre comment le climat évolue et pouvoir distinguer la variabilité naturelle et le signal de changement.

La 5^e fiche décrit les différentes méthodes de représentation des résultats des modèles climatiques. Elle donne quelques clés de lecture pour comprendre les graphiques et cartes souvent utilisés par les climatologues.

Les fiches 6 et 7 sont plus techniques, elles présentent la manière dont sont construites les projections climatiques globales et régionales.

Enfin, la 8^e fiche aborde la correction de biais, l'étape statistique permettant de corriger les projections des modèles climatiques

¹ Syndicat Mixte d'Aménagement de la Vallée de la Durance

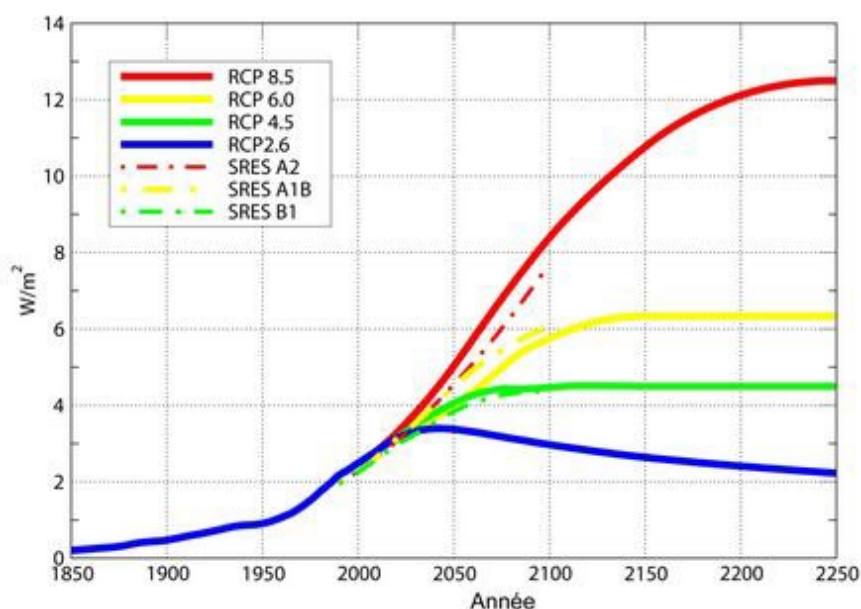
Vous avez dit RCP 8.5 ? C'est quoi un scénario d'émission de gaz à effet de serre ?

Le Chiffre Clé

+ 8.5 W/m² C'est la valeur définie pour le forçage radiatif en 2100 selon le scénario RCP 8.5.

Ce scénario le plus pessimiste est celui qui correspond à la poursuite des émissions au niveau actuel avec une concentration en CO₂ de 1000 ppm (parties par million) en 2100 contre 400 ppm aujourd'hui.

Le Visuel



Évolution du forçage radiatif historique et futur (scénarios SRES et RCP)
(Source : www.drias-climat.fr)

En résumé

La concentration des Gaz à Effet de Serre (GES) dans l'atmosphère explique en grande partie la modification du climat de la planète et le réchauffement climatique observé aujourd'hui. Une fois émis, ces gaz peuvent rester dans l'atmosphère pendant plus d'un siècle et contribuent à l'inertie de la machine climatique. Afin d'évaluer le climat futur, les scientifiques ont construit des scénarios futurs qui caractérisent l'évolution du forçage radiatif : les scénarios RCP.

Les gaz à effet de serre

On dénombre de nombreux gaz à effet de serre (GES) : vapeur d'eau, dioxyde de carbone (CO₂), méthane (CH₄), protoxyde d'azote (N₂O), gaz fluorés CFC. Ces gaz ont un cycle naturel. Depuis la révolution industrielle, ils sont produits en partie par l'activité de l'homme ce qui amène à modifier leur cycle naturel. Afin de comparer leur effet sur le climat, on a défini le potentiel de réchauffement global de ces gaz, exprimé en équivalent CO₂ : 300 pour le N₂O et plus de 10000 pour les CFC.

La concentration du CO₂ dans l'atmosphère de la planète est relativement homogène. Elle est mesurée à Hawaï, loin des sources d'émission, depuis 1958 (courbe de Keeling). On observe une augmentation rapide et continue de la concentration de CO₂ de 300 ppm en 1960 à 410 ppm en 2020. Les évolutions futures des scénarios RCP représentent des concentrations de CO₂ de 400 ppm (RCP2.6) à 1000 ppm (RCP8.5) à l'horizon 2100.

Une fois émis, les GES peuvent rester un temps plus ou moins long dans l'atmosphère. Leur temps de résidence varie de quelques jours pour la vapeur d'eau à un siècle pour le CO₂ et le N₂O, voire plusieurs millénaires pour certains CFC. La permanence de ces gaz dans l'atmosphère provoque une inertie de la machine climatique aux modifications des émissions dues à l'activité humaine. Le climat actuel reflète les émissions produites lors du siècle dernier. Nos émissions actuelles conditionnent le climat jusqu'en 2050 voire au-delà.

Le forçage radiatif

La planète reçoit le rayonnement solaire et émet un rayonnement infrarouge. On appelle forçage radiatif l'écart entre le rayonnement reçu et émis. Un forçage négatif signifie que la planète se refroidit. Au contraire, un forçage positif signifie qu'elle se réchauffe. Le forçage radiatif est estimé au sommet de la troposphère (entre 10 et 16 km d'altitude) et exprimé en W/m² (Watts par m²). Ce concept permet de quantifier de manière simple l'impact de très nombreux facteurs sur le réchauffement climatique. L'émission de GES dans l'atmosphère conduit à une augmentation du forçage radiatif. Au contraire, l'émission d'aérosols (industrie, éruption) conduit à une baisse du forçage radiatif. Les périodes glaciaires observées correspondent à des modifications de l'orbite terrestre (trajectoire de la planète autour du soleil) ayant pour conséquence un forçage radiatif négatif.

Les scénarios d'émissions

Le forçage radiatif passé est connu. Il a augmenté de 0 en 1850 à +3 W/m² en 2020 produit principalement des activités industrielles. Afin d'imaginer le futur du climat, des courbes d'évolution du forçage radiatif ont été caractérisées par les experts du climat et reprises par les rapports du GIEC : ce sont les scénarios RCP 2.6, 4.5, 6.0 et 8.5 (pour *Representative Concentration Pathway*). Le RCP 8.5 correspond à une valeur + 8,5 W/m² en 2100.

Cette famille de scénarios fait suite aux scénarios SRES B1, A1B et A2 (*Special Report on Emissions Scenarios*) précédemment utilisés. Si l'on compare les scénarios RCP aux scénarios SRES (cf. figure ci-dessus et tableau ci-dessous), on constate que le scénario RCP 8.5 est un peu plus pessimiste que le scénario SRES A2, le RCP 6.0 est proche du SRES A1B, tandis que le RCP 4.5 est proche du SRES B1. Le seul scénario sans équivalent est le RCP 2.6 qui intègre les effets d'une politique de réduction des émissions susceptible de limiter le réchauffement planétaire à 2°C en 2100 (Accord de Paris).

Scénario	Forçage radiatif	Concentration (ppm)	Trajectoire
RCP8.5	>8,5W.m-2 en 2100	>1370 eq-CO2 en 2100	Croissante
RCP6.0	~6W.m-2 au niveau de stabilisation après 2100	~850 eq-CO2 au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP4.5	~4,5W.m-2 au niveau de stabilisation après 2100	~660 eq-CO2 au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP2.6	Pic à ~3W.m-2 avant 2100 puis déclin	Pic ~490 eq-CO2 avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin

Les modèles climatiques globaux permettent de transformer les scénarios de GES en projections climatiques (voir fiche Modèles Climatiques Globaux).

Mots clés : Gaz à effet de serre, forçage radiatif, RCP

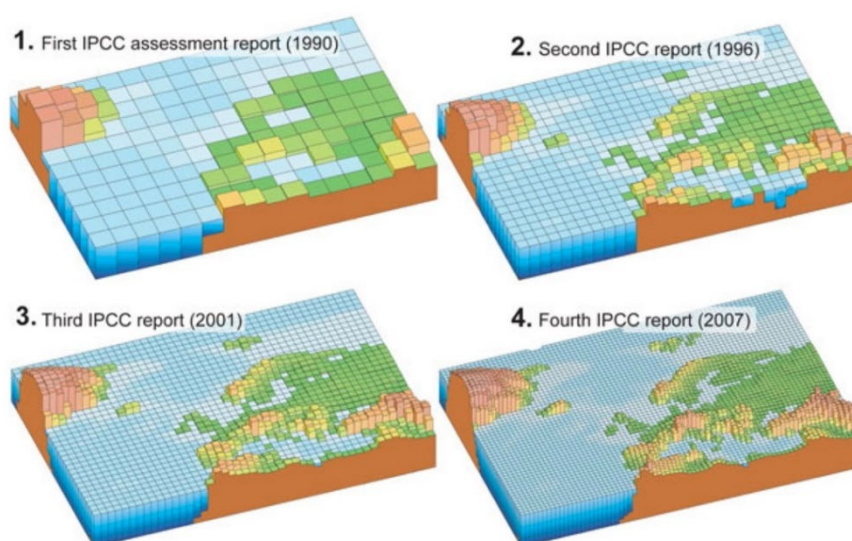
Les GCM, des grosses machines pour simuler le climat futur, mais pas que...

Le Chiffre Clé

150 ans

C'est la période de simulation actuelle des GCM (*Global climate model*), à cheval entre le XX^e et le XXI^e siècle (entre 1950 et 2100).

Le Visuel



*Évolution de la résolution spatiale des GCM
(Source : Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007)*

En résumé

Les Modèles Climatiques Globaux permettent de caractériser le climat futur en représentant l'atmosphère et ses interactions avec les continents, la circulation océanique, l'évolution des grandes masses de glace. Les données d'entrée (appelées forçages) permettent de caractériser les paramètres influant sur le climat, qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique. Les résultats permettent de caractériser le climat futur à l'échelle globale (planétaire), mais ne sont pas directement utilisables à l'échelle des territoires.

De la modélisation de l'atmosphère à celle du système Terre

Les exercices de modélisation du climat futur se basent sur une représentation simplifiée de l'atmosphère et la prise en compte des principes physiques de circulation (mécanique des fluides) et d'échanges de chaleur (thermodynamique). Les modèles se sont progressivement complexifiés en intégrant la circulation thermohaline des océans (due aux différences de température et de salinité) et ses interactions avec la glace (banquise, calottes glaciaires), les interactions entre l'atmosphère et les surfaces continentales (végétation), les cycles biogéochimiques liés (aérosols, azote, méthane, végétation). On parle aujourd'hui de modélisation du Système Terre (Earth System Model) ou plus généralement de modèle global de climat ou GCM, de l'anglais *Global Climate Model*.

Quelles données d'entrée ? Et quels résultats ?

Les données d'entrée des GCM (appelées forçages) permettent de caractériser les principaux paramètres agissant sur le climat, qu'il s'agisse de phénomènes d'origine naturelle (orbite terrestre, rayonnement solaire, éruptions volcaniques) ou anthropique (concentrations de gaz à effet de serre et aérosols dans l'atmosphère).

Les sorties des GCM permettent de caractériser en tout point du globe les évolutions dans le temps des variables météorologiques et océaniques, les cycles physiques et biogéochimiques, le tout au pas de temps journalier mais sur des mailles grossières. La résolution spatiale des GCM s'est progressivement améliorée, passant de 500 km dans les années 1990 à environ 100 km aujourd'hui. Toutefois, ces résultats ne sont pas exploitables directement à l'échelle d'un territoire et nécessitent un travail de régionalisation (voir fiche Régionalisation) ou descente d'échelle. Même s'ils sont généralement disponibles en libre accès, les résultats nécessitent une forte expertise technique pour leur utilisation. Les rapports successifs du GIEC fournissent régulièrement un état de l'art de la connaissance sur le climat futur intégrant une synthèse des sorties des différents GCM existants aujourd'hui.

Pourquoi un modèle climatique n'est pas un modèle météorologique ?

Même s'ils fournissent les mêmes variables de sorties, les modèles climatiques et les modèles météorologiques sont fondamentalement différents dans leur application et répondent aussi à des questions différentes. Tous deux nécessitent des moyens de calculs extrêmement puissants. Les modèles météorologiques permettent de simuler les évolutions prévues de l'atmosphère, à partir d'un état initial, pour les quelques jours à venir et à une résolution spatiale très fine.

Ils ne prennent en compte que l'atmosphère et n'apportent pas d'information fiable au-delà de 15 jours (effet papillon, propriété chaotique de l'atmosphère). Les modèles climatiques simulent les évolutions de l'atmosphère et des compartiments qui interagissent avec elle (océans, glaces, végétation) sur des périodes allant de plusieurs décennies à plusieurs siècles et à une résolution spatiale grossière.

Les GCM ont leur évolution météorologique propre en raison de l'effet papillon, ce qui explique que la météorologie simulée est différente de celle observée sur la période historique. En revanche, le climat simulé (c'est-à-dire la distribution statistique des variables météorologiques) est semblable au climat observé.

Les modèles de prévision saisonnière intègrent des représentations de l'atmosphère mais aussi des océans qui ont une inertie thermique beaucoup plus importante. Ces modèles constituent ainsi un intermédiaire entre modèle météorologique et climatique, tirant profit de l'influence des conditions initiales des océans mais ne pouvant prévoir une météorologie au jour le jour.

Mots clés : Modèles climatiques globaux (GCM), modélisation, forçage, modèle météorologique

Quel a été le climat passé de la planète ? Est-on capable de le reproduire avec les modèles ?

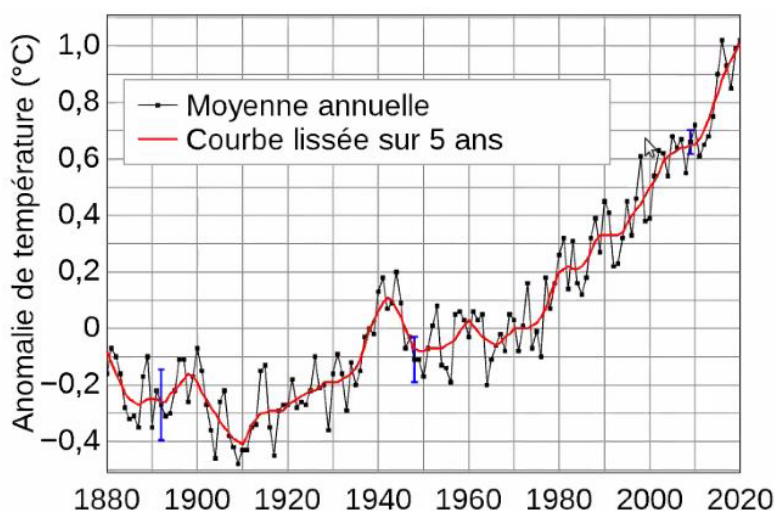
Le Chiffre Clé

+2.0°C

C'est l'anomalie de température qui traduit l'ambition des mesures des Accords de Paris pour le climat.

Attention, cette anomalie prend pour référence la période pré-industrielle, c'est-à-dire avant 1880.

Le Visuel



Anomalies de la température moyenne globale par rapport à la moyenne 1951-1980

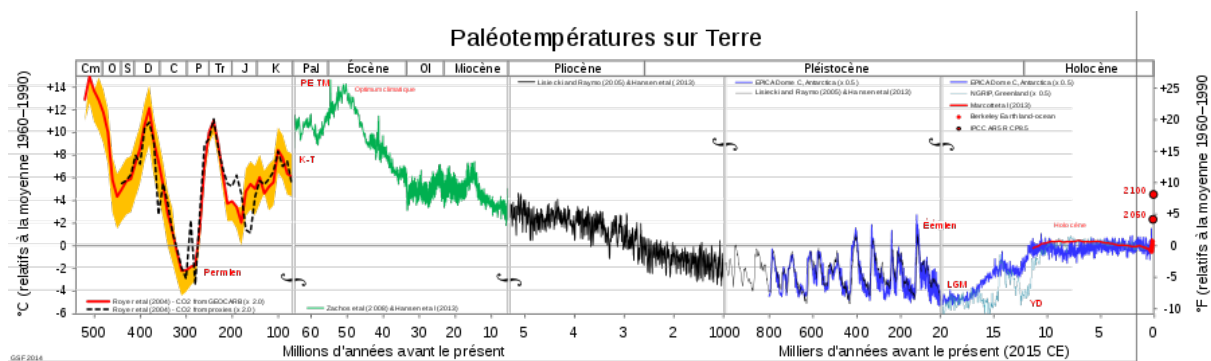
Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Réchauffement_climatique

La température moyenne globale, un bon indicateur du climat

La température moyenne de la planète ou température moyenne globale est souvent utilisée comme indicateur du climat et du réchauffement climatique. Elle permet notamment d'appréhender la variabilité historique du climat de la planète et de vérifier que les modèles climatiques globaux sont capables de reproduire les tendances observées sur cette température. Les graphiques présentent souvent une anomalie de la température moyenne globale par rapport à une température moyenne d'une période de référence qui peut varier d'une analyse à une autre. Par exemple, l'objectif visé par l'Accord de Paris de maintenir le réchauffement climatique en deçà des +2°C se base sur les observations de la période pré-industrielle, c'est-à-dire avant 1880.

Quel est l'évolution passée de la température globale ?

Si l'on observe l'évolution de la température de la planète de ces 150 dernières années, on constate une période relativement froide au début du XX^e siècle, suivi d'un réchauffement entre 1920 et 1940 probablement d'origine humaine. Entre 1950 et 1970, un refroidissement est observé comme conséquence de l'industrialisation d'après-guerre qui s'est traduite par de fortes émissions d'aérosols et donc une diminution du forçage radiatif. Ce phénomène est similaire à celui observé de manière temporaire suite à des éruptions volcaniques importantes. Depuis 1980, l'amélioration des process industriels a permis de limiter l'émission d'aérosols. En revanche, l'émission de grande quantité de gaz à effet de serre résultant de la combustion d'énergies fossiles (charbon, gaz naturel, pétrole) a fortement progressé (voir fiche Scénarios émissions) en provoquant une augmentation continue de la température depuis 1980.



Anomalies de la température moyenne globale par rapport à la moyenne 1960-1990

Source : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Paléoclimatologie>

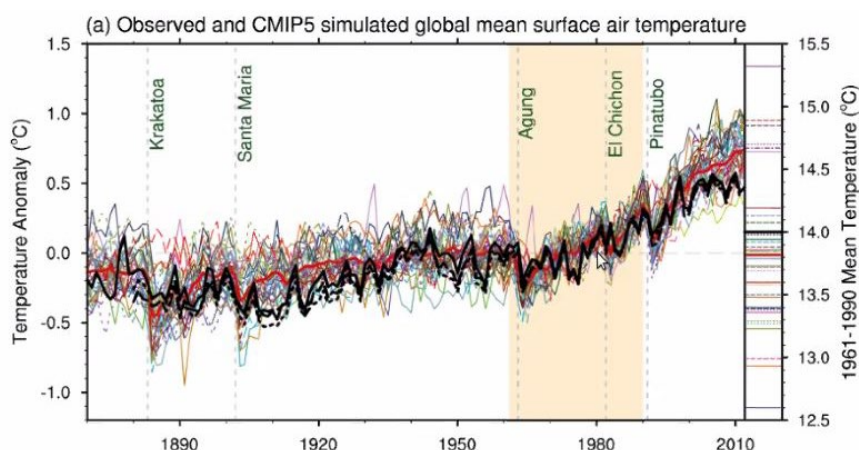
Si l'on s'intéresse à une histoire plus ancienne du climat de la Terre, on observe de manière générale une grande stabilité du climat depuis 10 000 ans (Holocène) qui a notamment permis le développement de l'agriculture. Cette période fait suite au Pléistocène (entre -10 000 ans et -1 million d'années) qui a vu le climat de la planète alterner entre réchauffements et refroidissements avant de s'achever sur la dernière période glaciaire entre -20 000 ans et -10 000 ans. Une sous-période intéresse particulièrement les chercheurs : l'Eémien. C'est en effet la seule période au cours de laquelle l'homme aurait vécu sur une planète aussi chaude qu'aujourd'hui. Les températures projetées pour les décennies à venir sont en revanche complètement inédites : jamais l'espèce humaine n'a connu une planète aussi chaude que celle que nous connaissons d'ici la fin du siècle.

Les GCM sont-ils capables de reproduire le climat des 150 dernières années ?

Les GCM permettent de modéliser le climat passé à partir des forçages naturels et anthropiques observés (voir fiche GCM). Le graphique suivant extrait du 5^e rapport du GIEC rend compte des anomalies de température calculées par 36 GCM pour chaque année. On y observe l'effet sur le climat observé (noir) et sur le climat modélisé d'éruptions volcaniques majeures (Krakatoa, Santa Maria, Agung, El Chichon, Pinatubo). Par construction, la moyenne des anomalies de chaque GCM est nulle sur la période de référence 1961-1990.

En faisant la moyenne des simulations GCM, on lisse la variabilité d'une année sur l'autre que l'on observe et que l'on retrouve aussi dans les simulations individuelles de chaque GCM. On observe que les GCM sont capables de reproduire les grandes tendances du climat passé. Cependant, ces modélisations comportent 2 grands types d'incertitude associés :

- L'incertitude structurelle (ou épistémique) liée aux approximations faites par chaque GCM dans leur représentation du système Terre. La dispersion des résultats entre différents GCM en rend compte. Cette incertitude est en principe réductible en connaissant mieux le fonctionnement du système Terre et en améliorant sa modélisation à travers les GCM.
- L'incertitude liée à la variabilité interne de chaque GCM qui elle, en revanche, est irréductible. Cette dernière est due aux propriétés chaotiques du climat qui font que différentes initialisations d'un même GCM (avec les mêmes forçages) engendrent des météorologies et des climats légèrement différents. Les capacités de calcul actuelles des supercalculateurs permettent de faire plusieurs simulations (ou runs) pour différentes initialisations afin d'estimer cette incertitude.



Anomalies de la température moyenne globale par rapport à la moyenne 1960-1990

Source : IPCC (2014) Fig. 9-08-1 <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/evaluation-of-climate-models/>

Mots clés : climat, variabilité, GCM

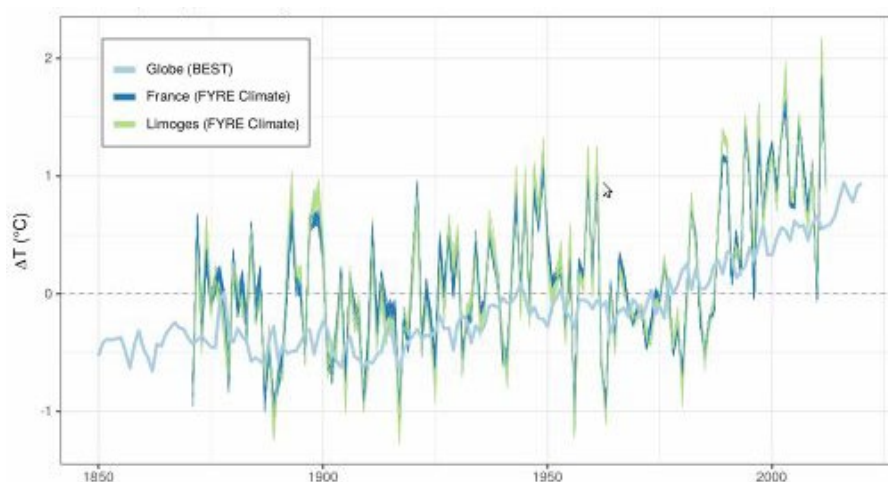
Le changement climatique à l'échelle plus locale : des contraintes en plus ?

Les Mots Clés

Signal C'est la tendance d'évolution d'une variable.

Bruit C'est l'amplitude des variations possibles autour de cette tendance.

Le Visuel



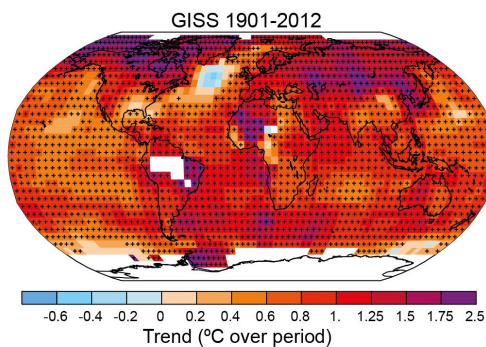
Anomalies de la température moyenne annuelle par rapport à la moyenne 1961-1990
Source : Rohde & Hausfather (2020) for BEST, Devers et al. (2021) for FYRE Climate

Le changement climatique n'est ni uniforme ni linéaire, comment la tendance peut-elle aider à appréhender ces différences d'évolution ?

Certaines régions se réchauffent plus que d'autres. Par exemple en Arctique, il y a un phénomène d'amplification dû à la fonte de la banquise. Le pouvoir de réflectance (albédo) de l'eau est beaucoup plus faible que celui de la glace et donc le rayonnement solaire est plus absorbé, conduisant à un réchauffement encore plus prononcé et donc à une fonte accrue. Le changement évolue également au cours du temps. Il y a eu notamment une période de ralentissement du réchauffement durant la période d'après-guerre à cause de la forte pollution atmosphérique. La quantité importante d'aérosols dans l'atmosphère contrebalançait l'effet des GES. La tendance précise la pente d'évolution d'une variable. Pour la température par exemple, elle se mesure en nombre de °C pour une période donnée. Observer cette évolution permet de détecter un éventuel signal et de le comparer d'une région à l'autre ou d'une époque à l'autre.

Pourquoi les tendances globales sont plus précises que les tendances locales ?

La moyenne est un outil très efficace pour observer une tendance car elle efface les valeurs extrêmes. Par exemple, un hiver particulièrement froid en Europe peut être compensé par un épisode de chaleur durant l'été australien. Plus il y a de données prises en compte, plus ce phénomène de lissage est marqué. Si on observe un événement extrême à une échelle géographique plus restreinte, il aura plus d'influence sur la moyenne annuelle à cette échelle, l'évolution de la température présentera une variabilité interannuelle plus importante, que l'on désigne aussi comme du bruit. Réduire le pas de temps d'observation augmente également la variabilité ainsi, une moyenne saisonnière ou mensuelle sera plus variable qu'une moyenne annuelle. Si le bruit est trop important, il peut masquer un signal. La tendance devient significative si le signal est plus fort que le bruit. C'est-à-dire, si l'augmentation (ou la diminution) est plus forte que la variabilité habituelle de la donnée observée.

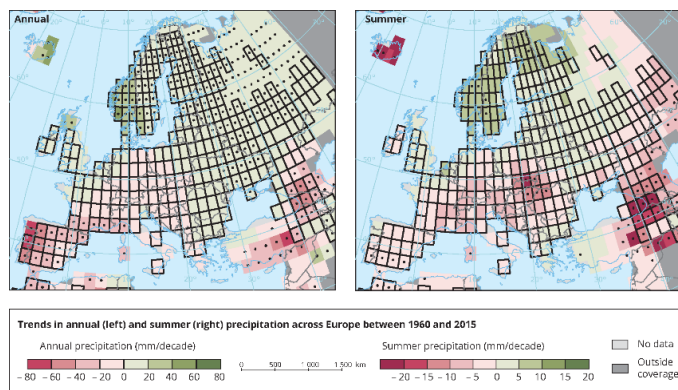


Tendance en °C sur la période 1901-2012 (IPCC, 2014), les points indiquent les zones pour lesquelles la tendance est significative par rapport à la variabilité d'une année sur l'autre.

Qu'en est-il de l'évolution des précipitations ?

L'évolution des précipitations à l'échelle globale est moins franche que celle des températures. Sur certaines régions des tendances peuvent tout de même se révéler. En Europe, globalement les précipitations annuelles augmentent dans le nord et l'est, mais diminuent dans la zone méditerranéenne. Il s'agit cependant d'une donnée très variable que ce soit dans le temps ou l'espace. Les régions pour lesquelles on observe une tendance significative sont donc moins nombreuses que pour les températures.

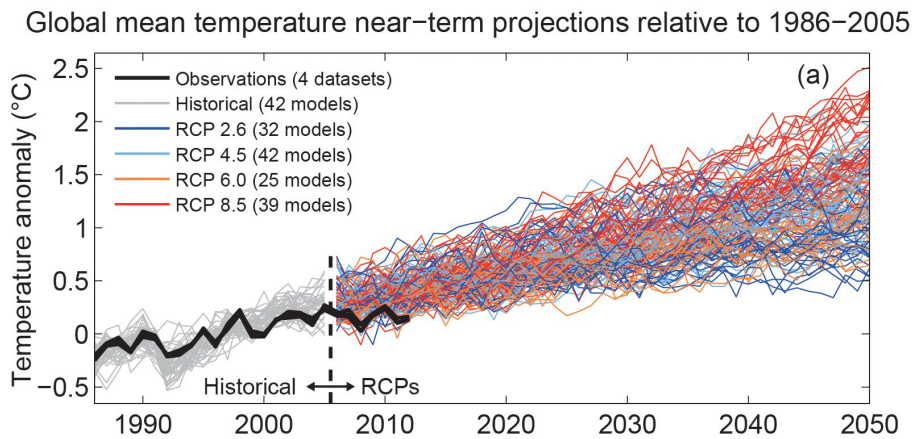
Tendances annuelle (gauche) et estivale (droite) des précipitations en Europe entre 1960 et 2015 (mm/décennie).



Mots clés : climat, variabilité, signal, bruit, précipitations

Comment représenter les projections climatiques ?

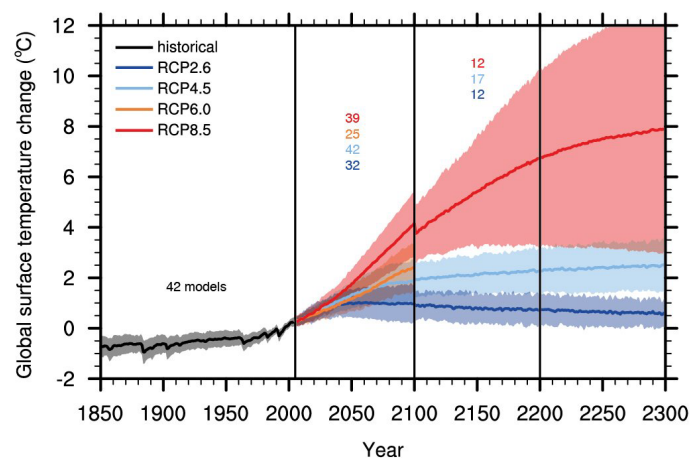
La représentation en « Spaghettis »



Représentation en spaghettis. Évolution de l'anomalie de moyenne de température globale par rapport à la période 1986-2005. Pour chaque expérience (forçage historique et les différents RCP), un run de chaque GCM est représenté par une courbe. (IPCC 2014)

Ce type de représentation permet de donner un aperçu de la variabilité possible du climat en présentant chaque expérience, tout en laissant les grandes tendances apparaître. Ici, on observe que les scénarios rouges (RCP plus élevé) sont majoritairement dans la partie haute du graphique et les scénarios bleus (RCP plus faible) dans la partie basse. Une courbe du scénario RCP 2.6 est cependant au-dessus de toutes les autres sur plusieurs années. Ce n'est pas forcément aberrant, c'est juste une possibilité d'avoir un climat plus chaud que la moyenne plusieurs années de suite.

La représentation en « Rubans »



Représentation en rubans. Évolution de l'anomalie de moyenne de température. (IPCC 2014)

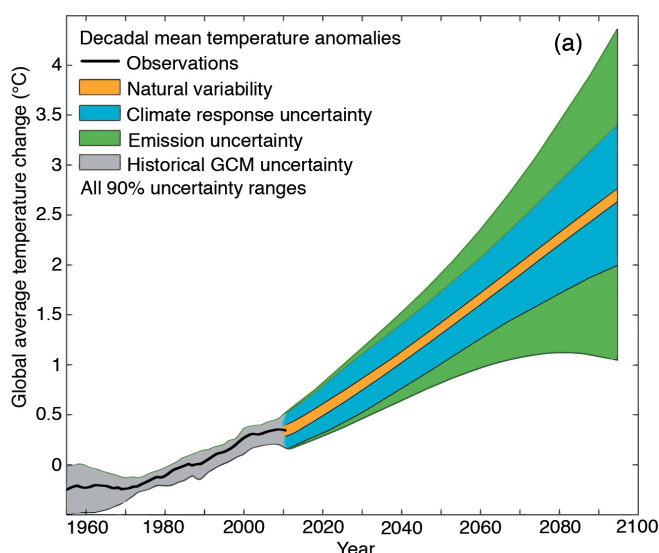
Dans ce type de représentation, sont montrés la moyenne (parfois la médiane) multi modèle de chaque expérience et l'intervalle 5%-95%. Il s'agit tout d'abord de supprimer les modèles qui présentent les valeurs les plus extrêmes. 5% sont retirés à chaque extrême (les résultats les plus froids et les plus chauds) pour ne laisser que l'intervalle des résultats obtenus par 90% des modèles.

L'avantage de cette représentation est d'avoir un graphique plus lisible. Cependant, le trait de moyenne représenté ne correspond pas à une évolution possible de la température moyenne globale. Car la moyenne (ou la médiane) supprime la variabilité possible d'une année à l'autre, elle montre juste la tendance.

On ne peut ainsi pas utiliser une moyenne de simulation en entrée de modèle hydrologique par exemple. La variabilité est de fait nécessaire pour représenter les sécheresses ou les phénomènes de crues, et de manière générale tous les écarts temporaires à une normale, même changeante.

Comment représenter les incertitudes ?

Le format classique pour indiquer l'incertitude utilisant le signe +/- s'adapte difficilement à des valeurs qui peuvent présenter une forte variabilité. Sur le premier graphique présenté avec une représentation en "spaghettis", certains GCM proposent des projections avec parfois plusieurs années particulièrement chaudes (exemple d'un GCM sur le RCP2.6), ou à l'inverse quelques années consécutives pouvant être particulièrement froides sur une tendance globale à la hausse (un GCM sur le scénario RCP 6.0). La diversité des possibilités présentées montre ainsi une partie de l'incertitude concernant les évolutions futures du climat.



Les différentes sources d'incertitude : choix du scénario d'émission, choix du modèle climatique, variabilité naturelle.
Source : IPCC 2014

Le graphique ci-dessus donne la proportion relative de chaque type d'incertitude sur la température moyenne globale à l'échelle de la décennie. Il montre que la plus importante source d'incertitude sur le réchauffement à venir est celle de la quantité des émissions futures (en vert) à partir de 2050.

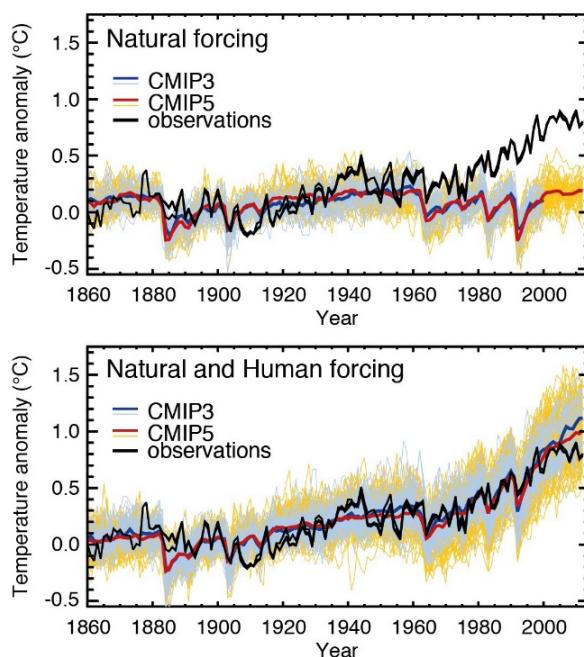
Tester les modèles, les comparer et produire des résultats

Le Chiffre Clé

34

Le nombre de modèles climatiques globaux (GCM) qui ont contribué à l'exercice CMIP5

Le Visuel



*Attribution de changements aux émissions anthropiques grâce à des modélisations uchroniques.
 Source : IPCC 2014*

Qu'est-ce que veut dire CMIP ?

Le projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP pour Coupled Model Intercomparison Project) permet une coordination mondiale des recherches sur le climat. Il s'agit de réunir tous les acteurs de recherche produisant des modèles climatiques globaux (GCM) pour s'accorder sur les expériences à soumettre aux différents modèles. L'objectif étant d'obtenir des résultats comparables et de proposer des projections sur la base d'une moyenne des simulations de tous les modèles. Chaque modèle est construit pour pouvoir modéliser la variabilité naturelle du climat en simulant une météo fictive qui répond aux conditions d'entrée que l'on donne au modèle (forçages). Les représentations graphiques montrent en général le résultat de chaque GCM pour laisser apparaître la variabilité possible du climat ; et la moyenne pour montrer la tendance d'évolution (voir fiche représentation des projections climatiques).

GIEC, DRIAS2020, etc. De nombreuses recherches sont alimentées par les CMIP.

Le CMIP s'organise en différentes phases correspondant aux différentes générations de GCM. Les plans d'expériences sont ainsi ajustés en fonction de l'évolution des méthodes scientifiques. La dernière phase CMIP5 a nourri le 5^e rapport d'évaluation du GIEC (2013-2014). Le CMIP6 vient de nourrir les conclusions du 6^e rapport (Août 2021-février 2022). Les résultats obtenus lors des différents CMIP sont mis à disposition via l'ESGF (Earth System Grid Federation), un réseau de centres de données permettant l'accès libre à toutes les simulations.

Pour construire un modèle climatique régional, il est nécessaire d'avoir un modèle global sur lequel on ajoute un modèle plus précis spatialement pour la région d'intérêt (RCM pour Regional Climate Model, voir Fiche 7). À l'échelle européenne, le projet EURO-Cordex permet de rassembler les différents RCM mis au point par différents instituts de recherche et de les associer avec certains GCM ayant participé aux exercices CMIP. DRIAS 2020 a permis d'ajuster les résultats d'EURO-Cordex pour montrer les données spécifiques à la France. Ce sont des travaux de longue haleine, par exemple entre le CMIP5 et DRIAS 2020, il y a 6-7 ans de travail. Les différentes études locales impliquant le changement climatique menées aujourd'hui se basent donc sur les GCM résultants de CMIP5 (voir fiche projections climatiques régionales).

Quelles sont les expériences appliquées aux GCM ?

Une série d'expériences synthétiques servent de tests aux modèles. Par exemple, les modèles tournent avec une planète composée uniquement d'un océan en supprimant tous les continents, ou bien avec une augmentation volontairement très importante de CO₂ de manière constante dans le temps ou abrupte. Il s'agit de calibrages techniques permettant d'observer le comportement du modèle et de vérifier sa sensibilité.

Le contrôle historique fait ensuite tourner le modèle avec les concentrations de GES et d'aérosols observés durant les 150 dernières années. Les résultats obtenus sont comparés avec les variables climatiques réellement observés. On vérifie ainsi que le modèle est bien capable de reproduire les grandes évolutions climatiques passées.

Puis, il y a les projections climatiques pour le futur. Pour celles-ci, plusieurs scénarios d'émission de gaz à effet de serre et d'aérosols ont été imaginés donnant différentes valeurs de RCP : 2.6 ; 4.5 ; 6 et 8.5. Ce choix de valeur de RCP est appelé forçage radiatif (voir fiche scénario émission GES). Enfin, il est aussi possible de créer des mondes uchroniques en modifiant certains paramètres du passé. Il s'agit par exemple de modéliser un monde dans lequel l'être humain n'a pas influencé pas les quantités de GES ou d'aérosols. Les forçages radiatifs donnés au modèle prendront donc en compte tous les éléments naturels comme les éruptions volcaniques sur les 150 dernières années, mais pas les émissions anthropiques.

Mots clés : CMIP, GCM, GIEC

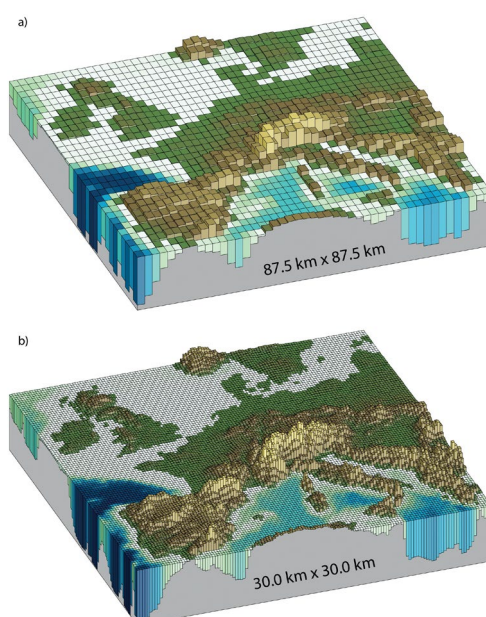
À l'échelle régionale, comment sont élaborées les projections climatiques ?

Le Chiffre Clé

14

C'est le nombre de projets de régionalisation climatique dans le monde.

Le Visuel



L'Europe modélisée avec deux résolutions spatiales différentes. Source : IPCC 2014

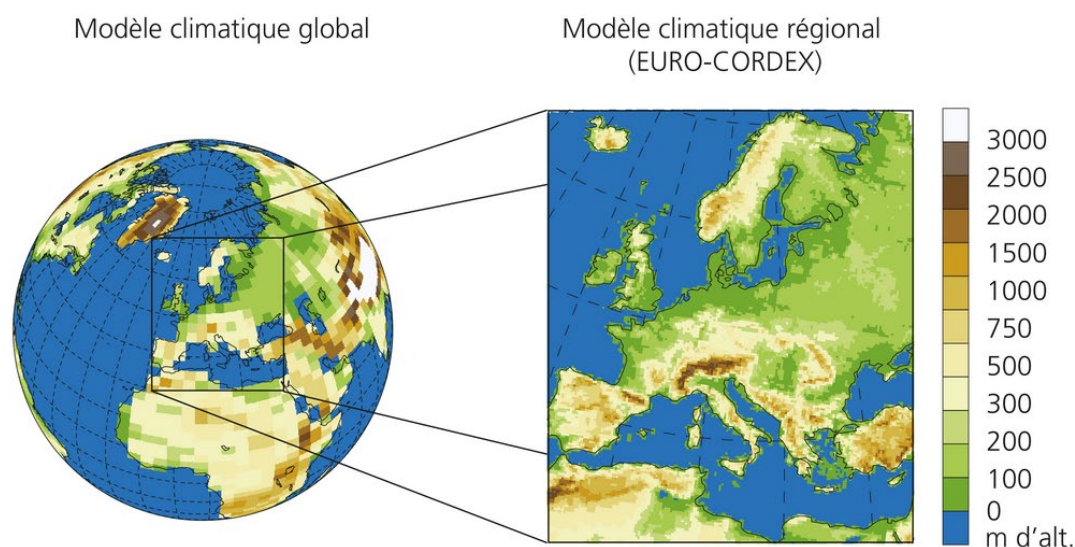
Les limites des modèles globaux pour établir des projections locales.

Pour construire un modèle climatique global, il faut recréer une maquette numérique de l'atmosphère et de l'océan. Pour cela, un maillage découpe la surface du globe où chaque maille correspond à une petite surface de terre ou d'océan. L'altitude ou la profondeur d'une maille sont uniformes et déterminées par une valeur moyenne. La résolution désigne la précision du modèle déterminée en fonction du nombre de mailles et de leur taille (plus elles sont petites, plus elles seront nombreuses et donc meilleure sera la résolution).

L'utilisation de moyenne pour déterminer les paramètres de chaque maille entraîne un phénomène de lissage. Avec une faible résolution, les montagnes s'élèvent moins haut et les vallées sont moins encaissées. Une résolution suffisante pour le calcul de la température moyenne globale par exemple est parfois insuffisante pour représenter certains phénomènes météorologiques caractéristiques locaux. C'est le cas par exemple du Mistral, le vent du nord qui s'engouffre dans la vallée du Rhône. Avec une résolution trop faible, la vallée moins marquée ne jouera plus le rôle d'entonnoir qu'elle présente en réalité.

Il n'est cependant pas possible d'augmenter la résolution d'une projection globale sur la totalité de la planète. Chaque maille servant de base pour une colonne de calculs permettant de représenter ce qui se passe à chaque niveau de l'atmosphère et de l'océan, chaque fois que le maillage est resserré, le nombre de colonnes augmente et les calculs sont considérablement augmentés. La taille du maillage est donc limitée par la puissance et le temps de calcul nécessaires au modèle.

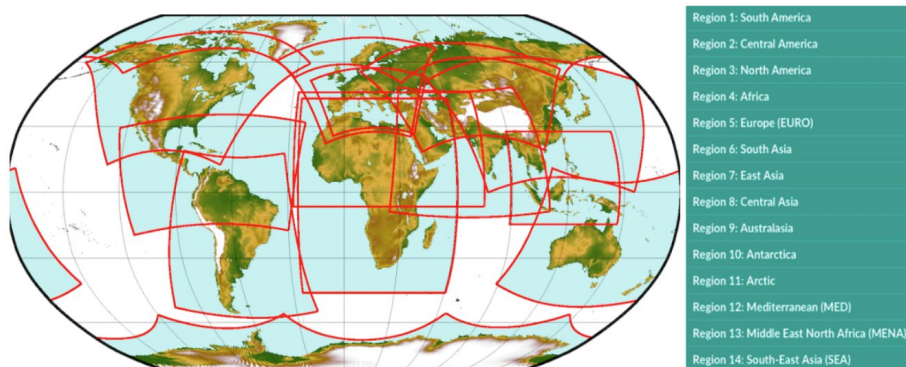
Comment construire un modèle local cohérent avec un modèle global ?



Un modèle climatique régional fonctionne avec une meilleure résolution sur une partie de l'atmosphère et utilise les éléments d'une modélisation globale pour alimenter ses bordures. En pratique, il s'agit d'utiliser une projection d'un GCM pour laquelle on supprime tout ce qu'il s'est passé dans l'atmosphère d'une région. On remplace ensuite ce « trou » par la simulation du RCM (modèle climatique régional) à plus haute résolution.

Vous avez dit CORDEX ?

CORDEX est l'abréviation de « coordinated experiments ». Il s'agit de programmes d'expériences coordonnées de régionalisation climatique. Il y en a un pour chaque région d'intérêt du globe (14 en tout). Pour le territoire de France métropolitaine, les deux régions qui peuvent apporter des informations intéressantes sont les régions Europe (EURO) et méditerranée (MED).



Les différentes régions présentant un Cordex

Pour EURO-Cordex, il existe 12 RCM différents. Ce n'est techniquement pas possible de faire tourner tous les RCM sur chacun des 34 GCM de l'exercice CMIP5 (voir fiche organisation des projections climatiques globales). Une première sélection permet de restreindre à 6 le nombre de GCM utilisés. Cette sélection a pour vocation à être la plus représentative possible pour la région observée.

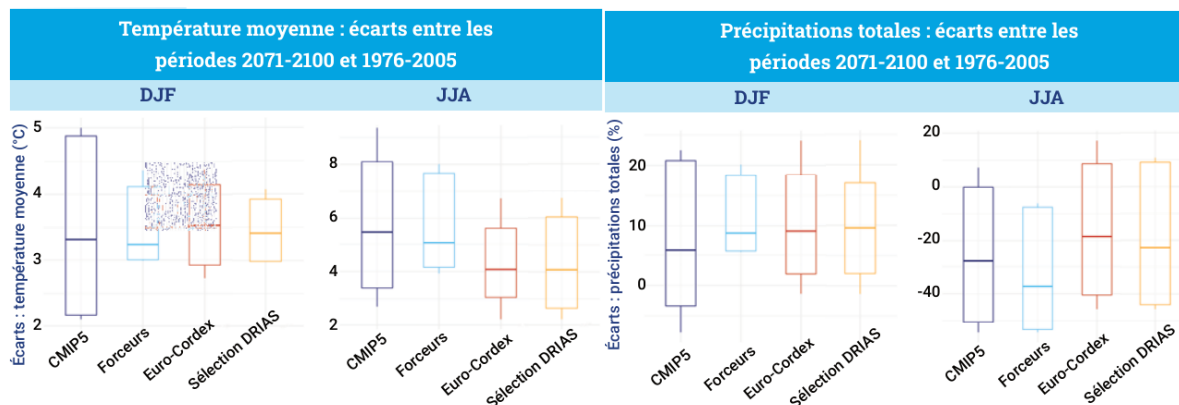
34 Couples de GCM-RCM sont ensuite formés. Pour établir les associations, une grille est constituée pour que chaque RCM tourne avec plusieurs GCM. Mais aussi qu'aucun GCM ou RCM ne soit favorisé par rapport à un autre et qu'il n'y ait pas d'influence plus importante de certains modèles dans les représentations statistiques.

En pratique :

Une fois les couples déterminés, les modèles vont fonctionner avec plusieurs types de forçages. Le premier test considère les données météorologiques historiques observées (provenant d'une réanalyse globale de l'atmosphère qui permet de reconstruire les évolutions météorologiques observées en tout point du globe) pour nourrir les bords du RCM et vérifier que le RCM reproduit bien la météo observée à l'intérieur du modèle. Pour le second test, les données météorologiques transmises au RCM sont celles projetées par un GCM avec le forçage radiatif historique observé. Ces deux tests permettent de s'assurer que les modèles sont bien capables de représenter des informations cohérentes. Pour finir, les RCM tournent avec les GCM forcés par les différents scénarios RCP futurs.

Comment analyser des résultats parfois différents entre GCM et RCM ?

Dans certaines simulations, les projections d'un RCM associé à un GCM peuvent différer des résultats apportés par le même GCM avec la projection globale seule. C'est difficile de savoir quel modèle est le plus juste pour diverses raisons (prise en compte des océans, différence de maillage, prise en compte des aérosols, ...)



Changements en fin de XXI^e siècle sous RCP 8.5. Source : Météo France

Comparaison des données fournies par les GCM de l'exercice CMIP5, les forceurs (sous-sélection de CMIP5 utilisée pour la régionalisation d'EURO-Cordex), les RCM d'EURO-Cordex et la sous-sélection de RCM prise en compte dans DRIAS 2020 (ajustement de quelques RCM au territoire français).

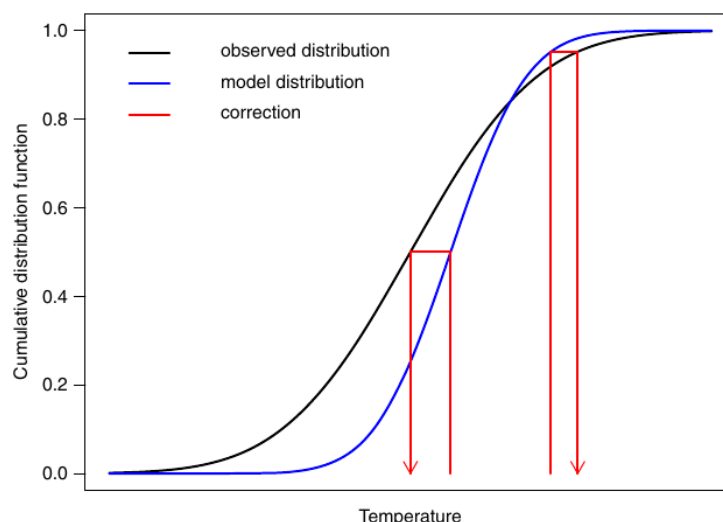
Le type de représentation précédente permet de comparer les résultats obtenus entre les différentes grandes séries d'expériences. Elles sont observées sous le scénario RCP 8.5 car c'est le scénario qui présente les tendances les plus marquées et les différences y sont donc plus visibles.

Les médianes présentent déjà des différences, mais les valeurs extrêmes sont encore plus compliquées à analyser, le nombre de modèles étant réduit pour les projections régionales, la dispersion y est artificiellement réduite.

Mots clés : climat, GCM, RCM, Corde

Qu'est-ce que la correction de biais ?

Le Visuel



Principe de la correction quantile-quantile. Source : Maraun, 2016

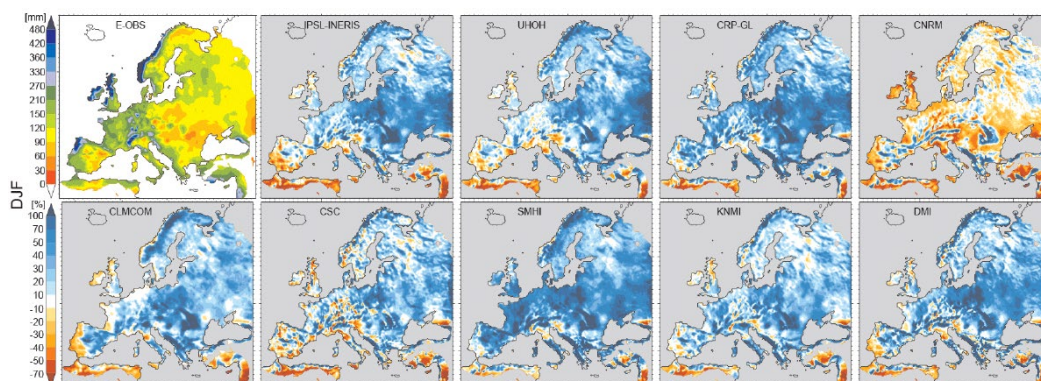
Comment lire le graphique

Dans la représentation ci-dessus, les courbes noire et bleue représentent des distributions statistiques cumulatives. L'ordonnée indique la part de valeurs de températures inférieures ou égales à la valeur présentée en abscisse parmi par exemple les températures hivernales moyennes journalières d'une période passée donnée. Ainsi la température correspondant à la valeur 0.05 est celle pour laquelle seulement 5% des données lui sont inférieures. La valeur 0.5 donne la médiane, à savoir la valeur de température pour laquelle 50% des données lui sont inférieures. La valeur 0.95 donne la température pour laquelle 95% des données sont inférieures et ainsi de suite.

Corriger les imperfections des modèles, c'est possible...

Les RCMs ne sont pas parfaits. Leurs erreurs sont notamment identifiées grâce aux réanalyses globales (voir fiche 7). Les données météorologiques historiques sont transmises au niveau des bords du modèle et celui-ci calcule la météo à l'intérieur du modèle qui peut être comparée à la météo passée.

Les GCM ayant également une part d'erreur, l'association finale ne donne pas un résultat exact. Des ajustements sont donc nécessaires pour corriger ces décalages entre les données modélisées et les données observées, c'est ce que l'on appelle la correction de biais.



Biais hivernal de précipitations des RCMs EURO-CORDEX (EUR-11 forcés par ERA-Interim) sur la période 1989-2008, par rapport au jeu d'observations au sol E-OBS (Haylock et al., 2008).

Source : Kotlarski et al. (2014).

Les cartes précédentes montrent la répartition géographique des biais de précipitation des RCM par rapport à une série de données observées. Les zones en bleu sont les zones pour lesquelles les modèles ont tendance à surestimer les précipitations par rapport aux observations et les zones en orange sont les zones pour lesquelles les modèles ont tendance à sous-estimer.

La correction de biais se fait à l'aide d'un outil statistique appelé correction quantile-quantile. Il s'agit de faire une distribution statistique des valeurs (par exemple de températures) observées sur une période donnée et des valeurs modélisées sur la même période. En comparant les deux courbes, il est possible de savoir pour quelles valeurs le modèle propose des valeurs surestimées et pour lesquelles il propose des valeurs sous-estimées par rapport aux observations. En quantifiant ces différences, il est possible d'en déduire la correction nécessaire pour que la courbe statistique des valeurs modélisées se superpose à celle des valeurs observées. Une fois cette correction obtenue, elle peut être appliquée à des données modélisées pour lesquelles il n'y a pas de données observées de références (par exemple pour les projections futures sous les différents scénarios RCP).

... Mais pose quelques questions

La correction quantile-quantile pose tout de même quelques questions méthodologiques. En premier lieu, dans les projections futures, il existe des températures qui sont supérieures aux températures observées dans le passé. Pour ces valeurs-là, il n'est pas possible de mesurer directement la correction de biais, il faut l'extrapoler.

Ensuite, se pose la question de la cohérence des corrections que ce soit spatialement ou entre les variables. Est-ce que la correction en un point sera cohérente avec la correction des points proches ? Est-ce que les précipitations et températures peuvent être corrigées séparément alors qu'elles sont, dans une certaine mesure, corrélées ? Enfin, se pose la question d'ordre philosophique de la possibilité d'appliquer une correction de biais construite dans un climat passé à un climat futur.

Et donc on peut dire quoi ?

La coordination internationale importante de la recherche sur le climat permet de prendre en compte un grand nombre de données, que ce soit des GCM, des RCM ou encore les jeux de données observées. En associant un maximum de scénarios, il est possible de déterminer les signaux qui se dégagent en observant les similitudes et les points pour lesquels la majorité des modèles se rejoignent.

Diverses expériences existent aussi pour tester les méthodes. Pour éprouver la méthode de correction de biais, il est par exemple possible de séparer la période de référence (si elle est suffisamment longue) avec les années froides d'un côté et les années chaudes de l'autre. La correction de biais est ensuite établie à partir des données des années froides et appliquée aux années chaudes. Ainsi, il est possible de vérifier la cohérence de la correction sur une période plus chaude que la période de référence.

Enfin, les rapports comme ceux du GIEC permettent, en compilant les données de nombreuses recherches, d'établir des conclusions robustes sur les signaux de changement dans les modélisations futures. Ce sont les valeurs plus détaillées qui sont à observer avec plus de précaution étant donné l'importance des incertitudes.
Mots clés : Biais, correction quantile-quantile, méthodologie

Mots clés : Biais, correction quantile-quantile, méthodologie