

# MOOC CLIMAT

Causes et enjeux du changement climatique



## SEMAINE 3 : LA MODELISATION DU CLIMAT

*Ce document contient les transcriptions textuelles des vidéos proposées dans la partie « Les projections centennales » de la semaine 3 du MOOC « Causes et enjeux du changement climatique ». Ce n'est donc pas un cours écrit au sens propre du terme ; le choix des mots, l'articulation des idées et l'absence de chapitrage sont propres aux interventions orales des auteurs.*

### *Les scénarios climatiques*

**Olivier BOUCHER**

*Directeur de recherche – CNRS*

Parler de scénario climatique, nous invite tout d'abord à nous interroger de manière générale sur le concept de scénario. Qu'est-ce qu'un scénario ?

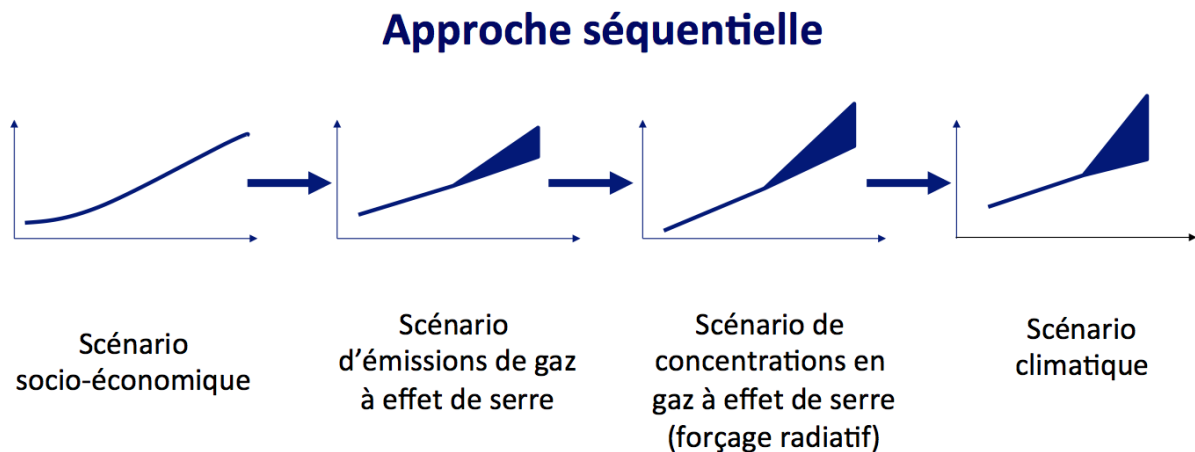
- C'est tout simplement une représentation d'un futur possible que l'on établit dans un but prospectif.
- Cette histoire du futur se veut exploratoire, elle doit être plausible, c'est-à-dire qu'elle ne doit pas contrevenir aux lois de la physique, elle ne doit pas s'écarter de trop de la théorie économique, ou alors, si elle le fait, ce doit être de manière explicite.
- Un scénario n'a pas à être probable et en général on ne cherche d'ailleurs pas à estimer la probabilité qu'il se réalise.
- Un scénario n'a pas vocation à représenter toute la complexité du monde qui nous entoure, c'est pourquoi il peut être simpliste, voire idéalisé.

- Enfin, un scénario peut-être volontairement utopique ou à contrario inacceptable.

Les scénarios climatiques, ne visent cependant pas à être normatifs, c'est-à-dire à imposer un futur donné. C'est pourquoi on considère non pas un mais plusieurs scénarios.

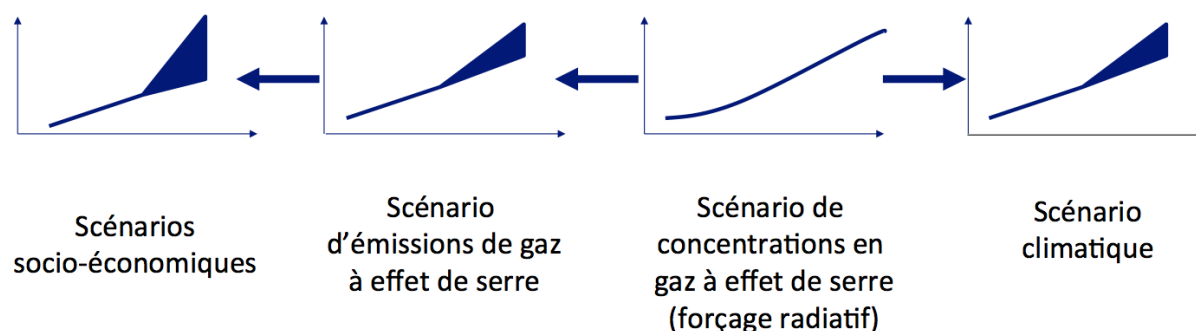
On distingue deux approches dans l'élaboration des scénarios climatiques :

- Dans une première approche, dite séquentielle, on part d'un scénario socio-économique que l'on peut ensuite traduire en scénario d'émissions de gaz à effet de serre.

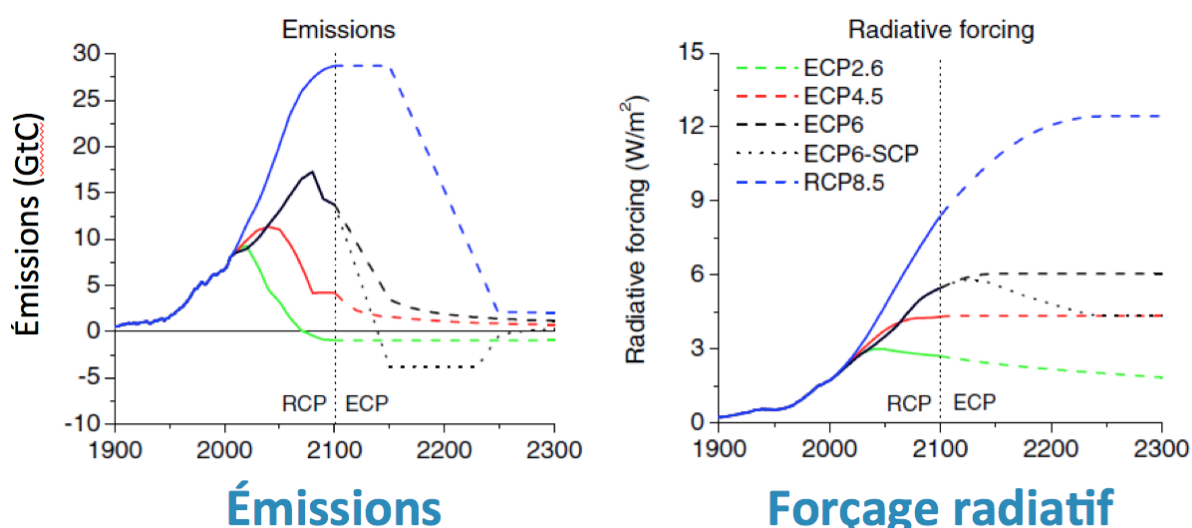


- On peut ensuite, à l'aide de nos connaissances des grands cycles biogéochimiques traduire cela en concentration de gaz à effet de serre et avec un modèle climatique, estimer le forçage radiatif associé à ces trajectoires de concentration et en prédire une projection climatique.
- À l'inverse, une deuxième approche que je qualifie ici d'inverse, part d'un scénario de concentrations en gaz à effet de serre ou un scénario de forçage radiatif à partir duquel on peut estimer un scénario climatique, comme précédemment, mais à partir duquel on peut aussi reconstruire à posteriori des scénarios socio-économiques qui sont compatibles avec ce scénario de concentration en gaz à effet de serre.
- Un scénario de forçage radiatif correspond donc à plusieurs scénarios socio-économiques compatibles.
- C'est cette approche qui a été choisie pour le cinquième rapport d'évaluation du GIEC parce que d'une part, elle permet de dépolitiser le débat quant au choix du scénario socio-économique, et d'autre part, parce qu'elle permet plus facilement de considérer des scénarios avec des politiques climatiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

## Approche inverse



⇒ Je donne un exemple ici : les quatre scénarios dits RCP - RCP pour *representative concentration pathways* -, qui ont été utilisés pour le cinquième rapport d'évaluation du GIEC.



Selon van Vuuren et al., *Climatic Change*, 2011

- Les forçages radiatifs varient entre des valeurs de 2,6 et 8,5 W par mètre carré en 2100, ce qui donne d'ailleurs les noms de ces scénarios, RCP 2,6 et RCP 8,5.
- ⇒ Il s'agit là de scénarios extrêmes avec un tas de scénarios intermédiaires.
- Ces scénarios impliquent des émissions de dioxyde de carbone qui sont représentées sur la gauche.
- ⇒ Pour le scénario RCP 2,6, les émissions doivent atteindre un plateau très rapidement avant de décroître et de s'annuler quasiment vers l'année 2080.
- ⇒ Pour le scénario RCP 8,5, au contraire, les émissions continuent d'augmenter jusqu'à atteindre une valeur de 27 gigatonnes de CO<sub>2</sub> en 2100, soit trois fois plus que les émissions actuelles.

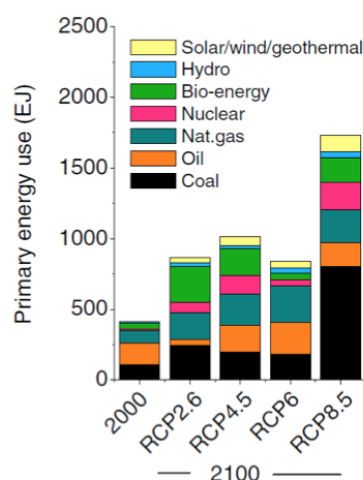
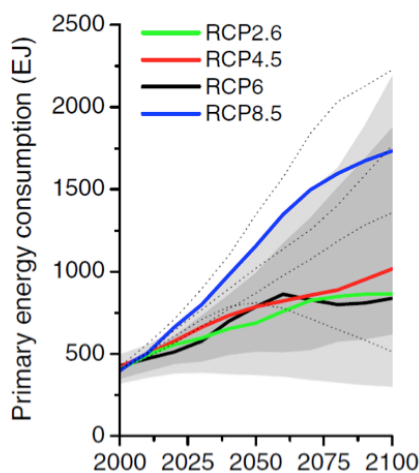
- Enfin, ces scénarios ont été prolongés au-delà du XXIe siècle de manière très stylisée et c'est ce qu'on voit avec les traits en tirets sur ce graphique.

Le dioxyde de carbone n'est pas le seul gaz à effet de serre qu'il faut prédire, et donc on envisage des scénarios pour les autres gaz à effet de serre, en particulier le méthane (CH<sub>4</sub>), et le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) que l'on montre ici.

- Les enveloppes grises, ici, cherchent à englober l'ensemble des futurs possibles sans politique d'atténuation des émissions.
- Les gaz à effet de serre ne sont pas les seuls facteurs qui influent le climat, il ne faut pas oublier qu'il y a aussi des polluants à courte durée de vie qui ont aussi un impact sur le climat, comme le dioxyde de soufre qui est responsable d'un forçage radiatif négatif lié à la formation d'aérosols soufrés et donc un refroidissement du climat, ou encore les oxydes d'azote qui combinés avec les composés organiques volatiles mènent à la formation d'ozone qui est un autre gaz à effet de serre.
- Ces polluants à courte durée de vie ont aussi un effet sur la qualité de l'air et donc en général, on peut considérer que leurs émissions et donc leur concentration va baisser au cours du XXIe siècle à une vitesse qui va dépendre des hypothèses que l'on fait sur la croissance économique et aussi sur la convergence entre pays en voie de développement et pays industrialisés, pays développés.

Il existe un certain nombre de paramètres importants qui permettent de caractériser ces scénarios socio-économiques, comme :

- La consommation d'énergie primaire ;
- le mix énergétique ;

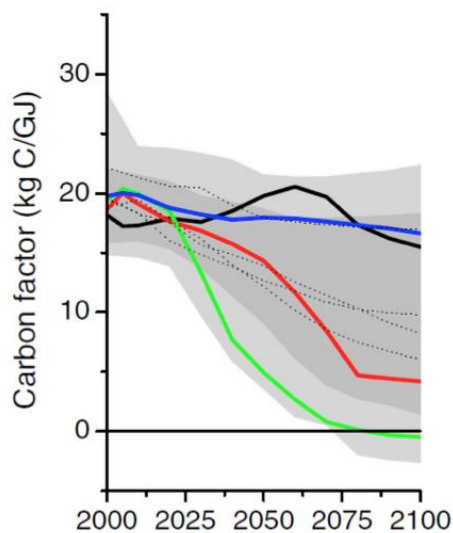


## Consommation d' énergie primaire (EJ)

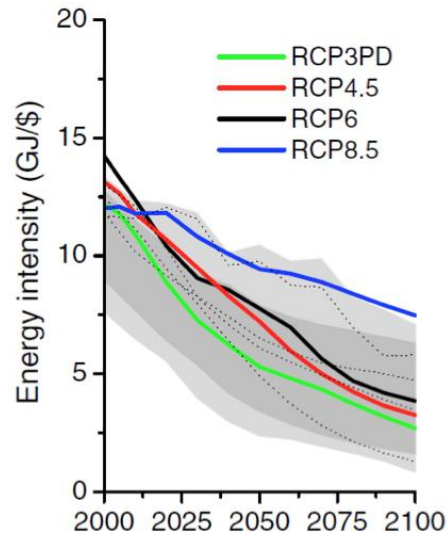
Selon van Vuuren et al., *Climatic Change*, 2011

Et deux autres paramètres, que je montre ici :

- D'une part le facteur d'émission en kilogrammes de carbone émis dans l'atmosphère par unité d'énergie utilisée



**Facteur d'émissions**



**Intensité énergétique**

Selon van Vuuren et al., *Climatic Change*, 2011

⇒ Ce facteur décroît relativement lentement pour les scénarios RCP 6 et RCP 8,5 qui sont forts en forçage radiatif, mais il décroît beaucoup plus rapidement pour les scénarios RCP 4,5, RCP 2,6, à la fois sous l'effet de l'introduction des énergies renouvelables mais aussi de la mise en place du procédé de captage et de stockage du carbone en sortie de cheminée pour les centrales thermiques et pour l'industrie lourde fonctionnant au charbon.

- Le deuxième paramètre important - qui est montré ici sur la droite -, est l'intensité énergétique, c'est-à-dire la quantité d'énergie nécessaire pour produire un dollar de produit intérieur brut, donc pour produire de la richesse.

⇒ Ce facteur décroît dans tous les scénarios, mais il rend compte aussi du type d'économie vers lequel le scénario peut s'orienter.

Au final, un scénario climatique nécessite :

- la connaissance des émissions ou des concentrations de gaz à effet de serre ;
- la connaissance aussi des émissions ou des concentrations de polluants à courte durée de vie ;
- mais aussi l'évolution de l'utilisation des sols sur les continents qui est une autre condition aux limites nécessaire au modèle de climat.

Enfin, si on veut traduire les projections climatiques qui ont été réalisées avec le modèle de climat en projection d'impacts, à la fois sur les écosystèmes ou sur les sociétés humaines, il faut combiner ces projections climatiques avec des données socio-économiques sous-jacentes qui sont dans les scénarios socio-économiques (comme la population, son degré d'urbanisation, la structure des sociétés, l'agriculture, l'industrie etc.).

Il existe un certain nombre de questions ouvertes sur ces scénarios climatiques.

- ⇒ On peut en particulier se poser la question de savoir si les scénarios extrêmes (RCP 2,6 et RCP 8,5), sont plausibles, ce qui renvoie à des paramètres ou à des hypothèses qui sont faites dans les modèles socio-économiques,
  - Comme par exemple le taux de décroissance des émissions.
- ⇒ Peut-on vraiment atteindre des réductions d'émissions de plusieurs pour cent par an ?
  - Sur les taux de croissance des rendements agricoles ;
  - Ou encore sur le taux d'investissement dans les combustibles fossiles.
- Mais surtout, il faut garder à l'esprit que les scénarios socio-économiques ne sont pas indépendants des scénarios climatiques compte-tenu du fait des rétroactions qui existent ou pourront exister entre l'évolution du climat et les politiques climatiques.
- ⇒ On peut s'attendre par exemple à ce que, si la sensibilité du climat à l'effet de serre est grande, alors les politiques climatiques deviendront plus ambitieuses au cours du XXI<sup>e</sup> siècle.
- Il y a aussi un certain nombre de paramètres qui sont incertains, difficiles à prévoir ou non pris en compte.
- ⇒ C'est le cas côté climat de la possibilité d'avoir des émissions massives d'hydrates de méthane contenues dans les sédiments marins ou avoir des émissions importantes de dioxyde de carbone et de méthane suite à la fonte du pergélisol en Sibérie et au Canada.
- ⇒ Côté socio-économique, il y a aussi la possibilité d'avoir des ruptures technologiques importantes qui sont difficiles à prévoir ou un recours éventuel à des techniques de géo-ingénierie du climat.

Il est donc important de garder ces incertitudes en tête et de considérer les scénarios pour ce qu'ils sont, une histoire d'un futur possible.

# Les projections climatiques : températures

**Laurent BOPP**

*Directeur de recherche – CNRS*

Dans cette vidéo, je vais vous présenter la façon dont sont réalisées les projections climatiques et pour ça, je vais prendre l'exemple de l'évolution des températures à la surface du globe.

Sur ce premier transparent, vous avez les ingrédients nécessaires à la réalisation d'une projection climatique.

- Alors, une projection climatique, c'est la réponse du système climatique à un scénario d'évolution des gaz à effet de serre, des aérosols, du forçage radiatif et cette réponse du système climatique est calculée grâce à un modèle climatique.
- Les deux ingrédients indispensables à la réalisation de projections climatiques sont donc d'une part des scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre par exemple, comme sur la gauche de ce transparent et, évidemment, un modèle climatique qui vous est ici décrit, présenté succinctement sur la droite de ce transparent.

Alors ces scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre et modèles climatiques ne sont pas suffisants, d'autres ingrédients sont aussi nécessaires pour réaliser ces projections climatiques.

- Les scientifiques utilisent aussi une indication sur l'évolution de forçages naturels et en particulier le forçage solaire (quelle est la variation de l'intensité de l'irradiance solaire) et sur le forçage volcanique.
- Alors, en l'absence d'indications précises, on utilise par exemple l'évolution à 11 ans avec ce cycle à 11 ans de l'évolution du forçage solaire au cours des prochaines décennies.

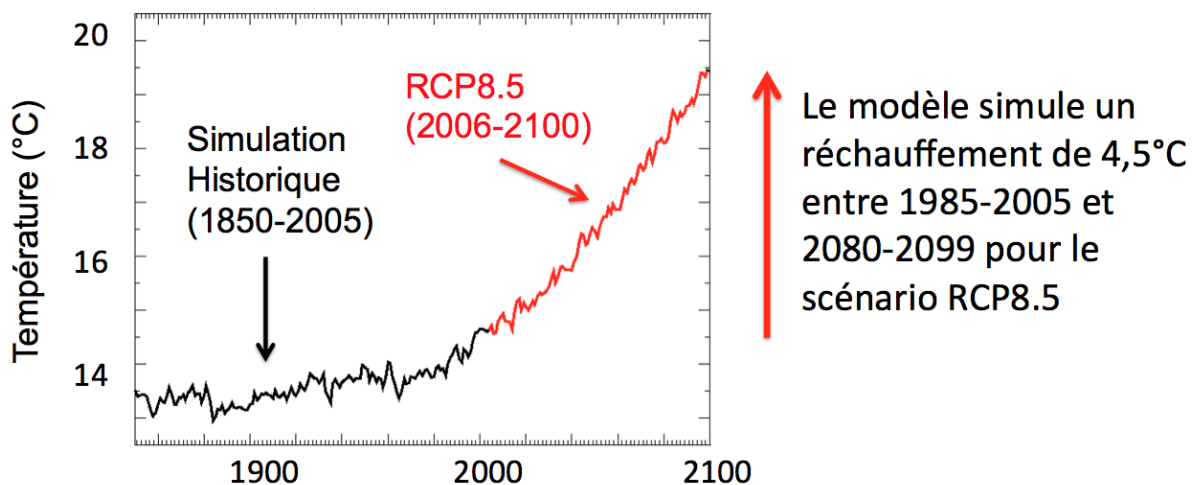
Les simulations de projection climatique démarrent aujourd'hui et vont se poursuivre sur plusieurs décennies jusqu'à par exemple la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, mais les scientifiques ont aussi besoin d'un état initial : comment démarrer la projection climatique ?

- Alors cet état initial est obtenu avec ce que l'on appelle une simulation historique qui va couvrir l'ensemble de la période historique où l'on utilise aussi un modèle climatique mais cette fois-ci forcée par l'évolution des gaz à effet de serre sur la période historique, telle que enregistrée dans, par exemple les glaces des pôles, mais aussi l'évolution des

forçages naturels, grandes éruptions volcaniques comme on le voit ici sur ce transparent ou variations de l'irradiance solaire.

- Une fois que vous avez l'évolution des émissions des concentrations de gaz à effet de serre et un modèle climatique, vous êtes capables de réaliser une projection.
- ⇒ Je vous en montre ici un exemple avec le modèle de l'IPSL, on regarde l'évolution de la température moyenne de surface du globe depuis 1850 jusqu'à la fin du XXIe siècle.
- ⇒ En noir, est représentée l'évolution de la température dans la simulation historique. La fin de cette simulation historique sert à initialiser votre projection climatique et en rouge, vous avez l'évolution de la température calculée par votre modèle climatique de 2005 à 2100.

## Évolution de la température de surface (moyenne globale)



- Dans le cas de ce scénario, le scénario RCP 8,5, les émissions de CO<sub>2</sub> et d'autres gaz à effet de serre sont importantes et le réchauffement simulé à la fin du XXIe siècle atteint +4,5°C par rapport à l'époque actuelle.
- Avec le même modèle ont été réalisées plusieurs projections climatiques qui, chacune, est liée à un scénario d'évolution des émissions ou des concentrations de gaz à effet de serre.
- ⇒ Et vous avez ici les quatre projections climatiques classiques qui ont été utilisées par les scientifiques dans le cadre du dernier rapport du GIEC avec le scénario rouge (RCP 8,5) en haut, augmentation de température de 4,5°C et par exemple le scénario vert, en bas, le RCP 2,6 où la température n'augmente que de 1,2-3°C à la fin du XXIe siècle par rapport à la période actuelle.
- Les résultats présentés ici ont été établis avec un seul modèle climatique. En fait la communauté internationale développe à peu près une quarantaine de modèles



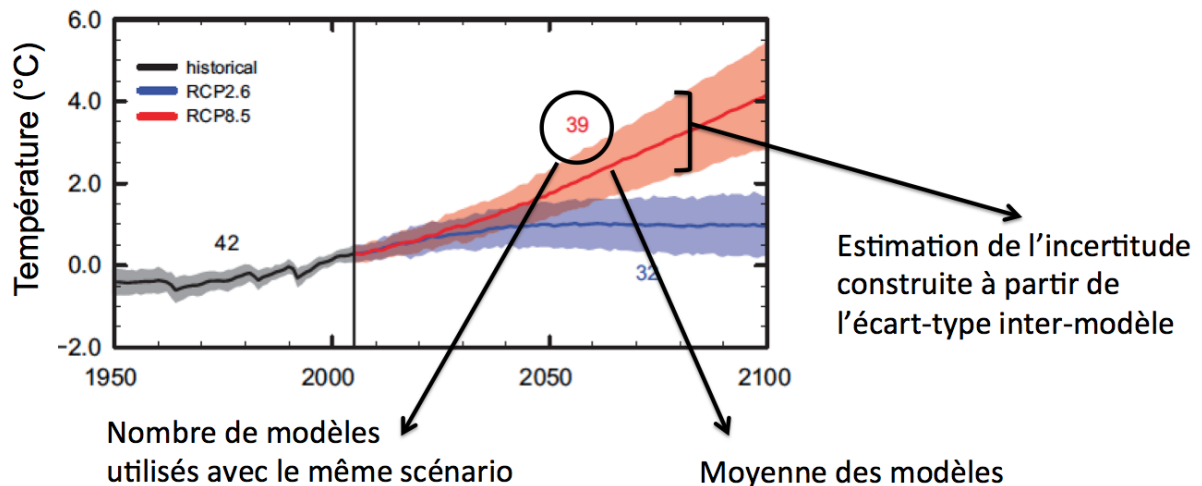
climatiques et ces différents résultats ont été réunis dans le dernier rapport du GIEC et c'est ce que vous avez ici sur cette figure-là, c'est la projection de l'anomalie de température de surface (toujours en moyenne globale) pour les, à peu près, 40 modèles.

⇒ Pour les deux mêmes scénarios, en rouge le scénario RCP 8,5 et en bleu le scénario RCP 2,6.

➤ Alors, pour utiliser les différents modèles, les scientifiques font deux choses :

- Ils font la moyenne des différentes projections, c'est la courbe située dans l'enveloppe rouge et puis dans l'enveloppe bleue et autour de cette courbe, de cette moyenne de modèle, vous avez une représentation de l'écart entre les différents modèles qui finalement donnent accès à une incertitude autour de la projection de température au cours des prochaines décennies.

### Anomalies de la température de surface (moyenne globale)



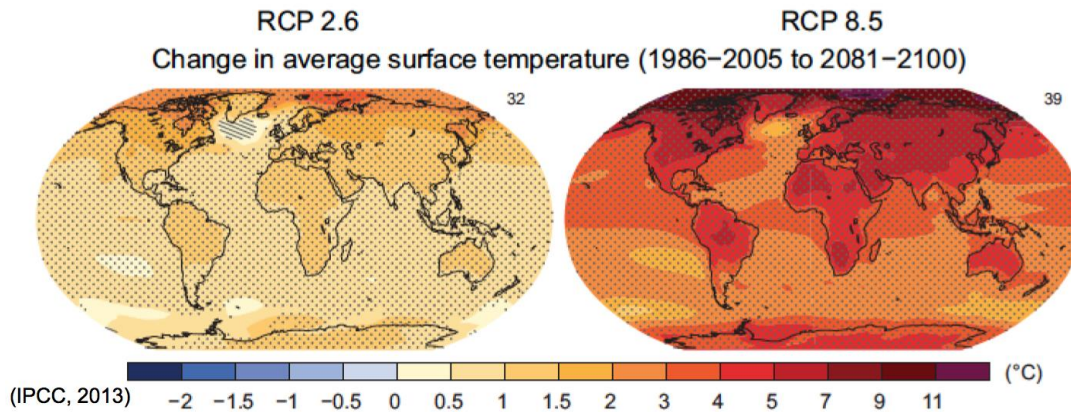
Alors, ces modèles climatiques ont été utilisés pour projeter encore une fois l'évolution de température dans le cadre de ces quatre scénarios et ils nous permettent d'obtenir une incertitude autour de ces projections.

⇒ Pour le scénario 8,5 par exemple, l'incertitude va de +2,6 à +4,8°C à la fin du XXIe siècle par rapport aux 20 dernières années.

L'utilisation de modèles climatiques permet évidemment de s'intéresser à l'évolution de la température moyenne globale, mais ces modèles climatiques nous permettent également de nous intéresser à l'évolution des températures régionales ou locales.

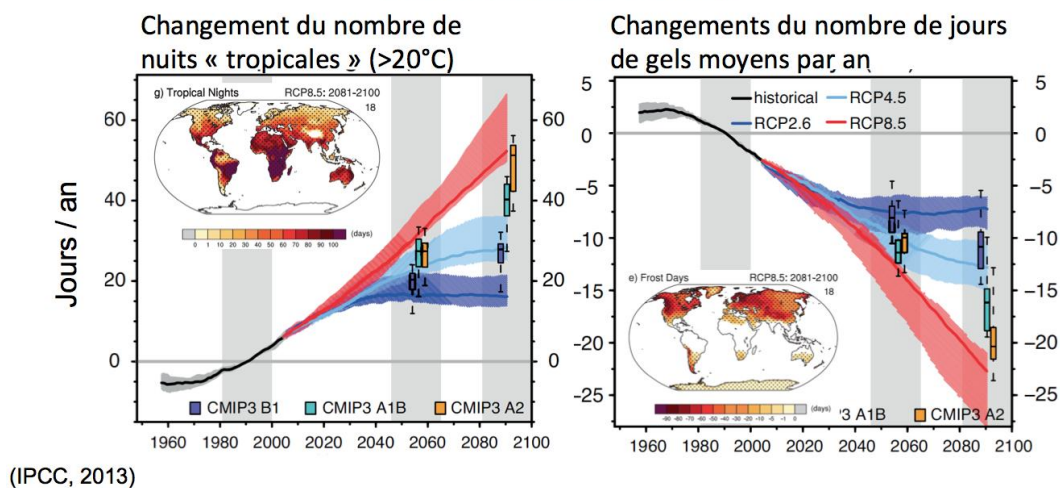
⇒ Et donc vous avez ici deux cartes qui vous indiquent le changement de température à la fin du XXIe siècle par rapport aux 20 dernières années, pour le scénario RCP 8,5 (donc le scénario où les émissions de gaz à effet de serre augmentent de façon importante), c'est ce que vous avez sur la droite de ce transparent et sur la gauche du transparent, vous avez l'évolution des températures pour le scénario bas, le scénario RCP 2,6.

## Anomalies de la température de surface (moyenne annuelle)



- On voit ici que les deux cartes sont évidemment très différentes :
  - une augmentation beaucoup plus importante dans le cas du scénario RCP 8,5 qui peut atteindre jusqu'à 10°C en Arctique par exemple ;
  - une augmentation de température qu'on voit nettement plus importante sur les continents que sur les océans ;
  - et dans le cas du scénario du RCP 2,6, il y a aussi des contrastes entre continents et océans, entre l'océan Arctique et puis le reste du globe, mais l'augmentation de température est nettement réduite par rapport à ce qu'on a sur le scénario RCP 8,5.
- Donc au-delà des aspects globaux et des aspects régionaux, les modèles de climat nous permettent aussi de nous intéresser à d'autres aspects de l'évolution de température.
- Je vous montre ici deux exemples de l'évolution de certains extrêmes de température.
  - Sur la droite, vous avez l'évolution du changement du nombre de nuits tropicales, donc ce sont les nuits dont la température moyenne est au-delà de 20 °C (évidemment plutôt concentrées dans les pays tropicaux).

## Évènements extrêmes



- ⇒ Ce que montrent les modèles climatiques, c'est que le nombre de nuits tropicales simulées par an va augmenter de façon importante dans le cas de certains scénarios climatiques.
- ⇒ Et vous voyez qu'avec le scénario RCP 8,5 qui est le scénario où les émissions sont importantes, le nombre de nuits tropicales en moyenne à l'échelle du globe augmente de près de 50 - 60 jours par an à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle.
  - Sur la droite, vous avez un autre type d'événement extrême, cette fois-ci c'est le nombre de jours de gel moyen par an, évidemment plutôt situés aux hautes latitudes et vous avez leur évolution en fonction des différents types de scénarios utilisés par les climatologues.

Pour conclure, j'aimerais rappeler ici que pour le même scénario, les modèles projettent des changements de température différents. C'est ce qui donne accès aujourd'hui à une estimation de l'incertitude autour des projections. Et le fait que les modèles projettent des changements de température différents, en fait, témoigne du fait que les modèles sont construits de façon un peu différente, font des hypothèses un peu différentes et donc que chacun des modèles a une sensibilité climatique à la même augmentation de gaz à effet de serre différente.

Cependant, il est important de noter que la principale incertitude n'est pas l'incertitude climatique mais bien l'incertitude du scénario choisi.

- ⇒ C'est ce que l'on a vu sur ces courbes bleues et ces courbes rouges, elles sont différentes même si on tient compte de l'incertitude et donc de ces barres d'erreur autour de ces moyennes de température.

Enfin dernier point, le changement de température à l'échelle régionale est très contrasté et non uniforme avec des augmentations de températures plus importantes sur les continents, dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud et les modèles, les projections climatiques donnent aussi accès à des informations temporelles sur l'évolution des événements extrêmes et de façon assez évidente, on a plus d'événements extrêmes chauds et moins d'événements extrêmes froids avec le changement climatique.

# Les projections climatiques : cycle de l'eau, cryosphère, océan et carbone

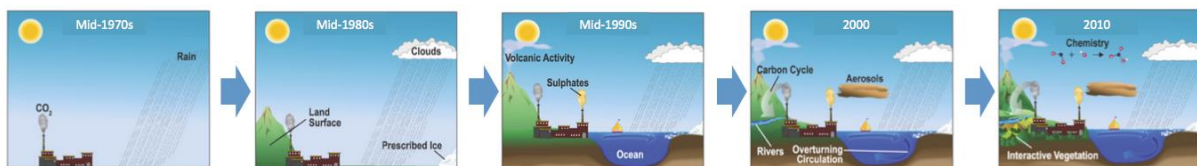
**Laurent BOPP**

Directeur de recherche – CNRS

Dans cette vidéo, nous allons nous intéresser à l'évolution du système climatique au cours des prochaines décennies mais au-delà de l'évolution de la température à la surface du globe, nous allons nous intéresser à d'autres aspects du système climatique.

Nous allons discuter du cycle de l'eau, du cycle du carbone, de l'évolution de l'océan et de l'évolution des surfaces englacées.

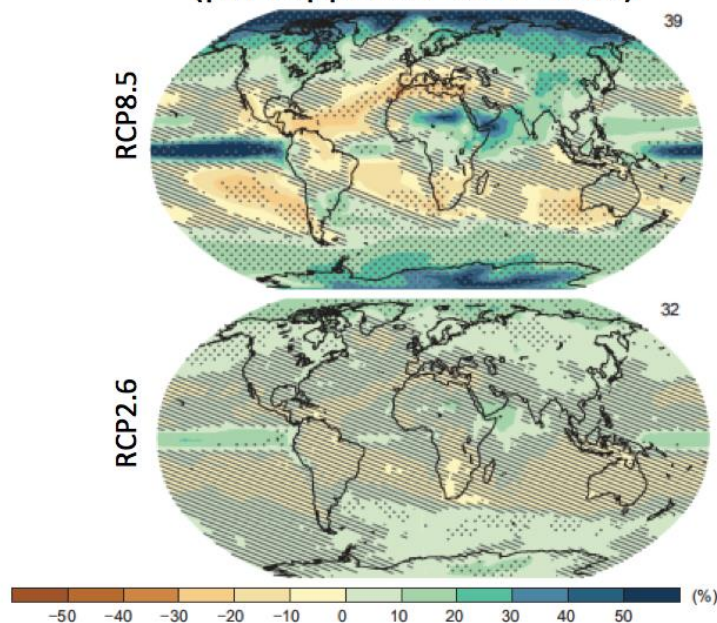
Alors, sur ce premier transparent, en bas, vous avez la façon dont les modèles de climat ont évolué au cours des dernières décennies.



La prise en compte de plus de processus, de plus de composantes du système climatique, permet aujourd'hui de réaliser des projections de l'ensemble de ces composantes du système climatique.

- Le cycle de l'eau est une des composantes essentielles évidemment du système de climat
  - ⇒ Ce que montrent les modèles climatiques, c'est une amplification du cycle hydrologique avec le changement climatique.
  - Vous avez sur les figures de droite la façon dont les précipitations vont évoluer en réponse aux changements climatiques.
  - À la fin du siècle, en 2100, par rapport à la période actuelle, les modèles de climat projettent une amplification des précipitations dans les zones qui sont déjà humides, comme les moyennes et hautes latitudes et comme la bande équatoriale, et une diminution des précipitations dans les zones sèches, comme les bandes subtropicales.
  - Vous avez deux cartes, encore une fois, nous représentons ici le scénario RCP 8,5 qui est le scénario où les émissions de gaz à effet de serre sont importantes jusqu'à la fin du siècle et le scénario en bas, RCP 2,6 où les émissions de gaz à effet de serre sont maîtrisées et diminuent fortement d'ici la fin du siècle.

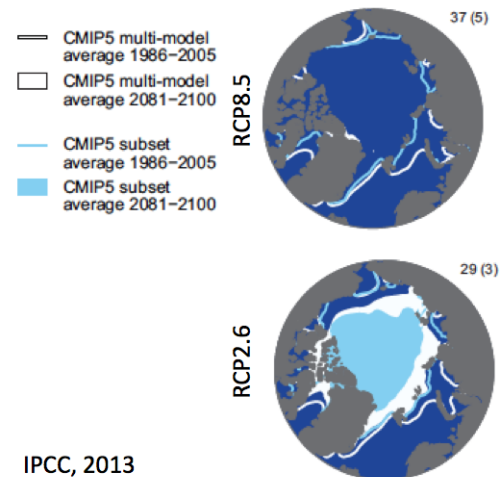
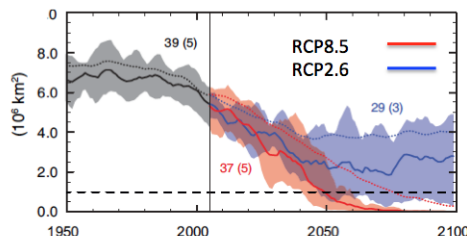
## Modifications des précipitations en 2081-2100 (par rapport à 1986-2005)



- Et on voit que cette modification de précipitations est évidemment beaucoup plus importante, à la fois du côté de l'amplification et de la réduction et dans le cas du scénario RCP 8,5.
- Deuxième aspect du système climatique, ici, l'évolution de la cryosphère et des surfaces englacées.
- Les modèles climatiques projettent une diminution importante de la couverture de la banquise en Arctique.
- ⇒ C'est le cas ici pour la banquise d'été, où nous regardons en bas l'évolution temporelle entre 1950 et 2100 de cette banquise au mois de septembre, de l'étendue de la banquise au mois de septembre.
- ⇒ Dans le cadre du scénario RCP 8,5, les modèles projettent une disparition quasi totale de la banquise d'été en Arctique d'ici à peu près la moitié du XXI<sup>e</sup> siècle.

## Les modèles projettent une diminution de l'extension de la banquise et de la couverture neigeuse de l'Hémisphère Nord

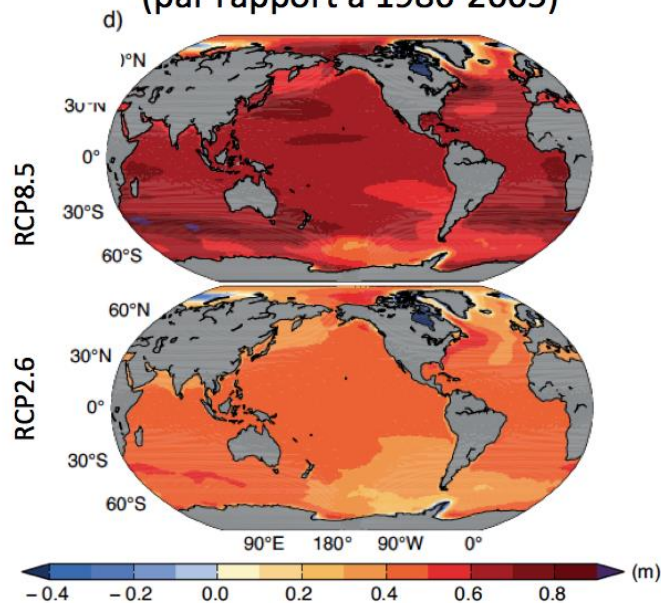
Évolution de l'extension de la banquise d'été (Septembre) en Arctique



IPCC, 2013

- ⇒ Dans le cas du scénario RCP 2,6 par contre, l'évolution du système climatique permet un maintien de la banquise d'été, certes réduite par rapport à l'actuelle mais un maintien jusqu'à la fin du XXIe siècle.
- C'est ce que montrent aussi les deux cartes que vous avez sur la droite de ce transparent.
- ⇒ A la fin du XXIe siècle, plus de banquise d'été en Arctique pour le scénario RCP 8,5 et le maintien d'une banquise pour le scénario RCP 2,6.
- Donc d'autres aspects de la cryosphère sont aussi modélisés par les modèles de systèmes Terre ou les modèles de climat.
- ⇒ C'est le cas de la couverture de neige dans l'hémisphère Nord dont les modèles montrent une diminution avec le changement climatique et c'est le cas aussi dans certains cas de l'évolution des calottes polaires Groenland et Antarctique.
- Autre aspect du système climatique, l'océan qui est une composante évidemment essentielle.
  - ⇒ Les modèles projettent une augmentation du contenu thermique de l'océan, l'océan va continuer à absorber la très grande majorité de la chaleur additionnelle générée par l'augmentation de l'effet de serre, plus de 90 % de cette chaleur additionnelle, et l'absorption de cette chaleur additionnelle génère évidemment une augmentation des températures de l'océan.
  - ⇒ Donc l'océan de surface va continuer à se réchauffer au cours des prochaines décennies.

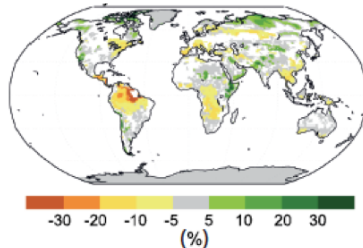
## Montée du niveau des mers en 2081-2100 (par rapport à 1986-2005)



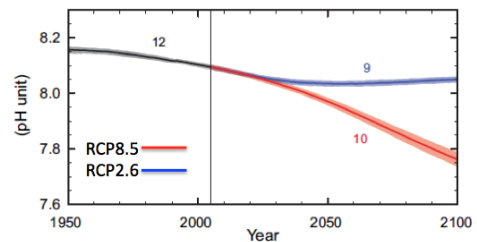
- En parallèle de cette absorption d'énergie par l'océan, les modèles simulent une augmentation de la surface des mers, de l'élévation du niveau des mers.
- Donc cette élévation du niveau des mers, elle est liée en partie à l'absorption d'énergie.
- ⇒ C'est la dilatation thermique mais elle est aussi liée à la fonte des glaciers continentaux et des calottes polaires.
- Donc cette augmentation du niveau des mers à la fin du siècle pourrait atteindre jusqu'à 1 mètre par rapport à l'actuel pour le scénario RCP 8,5.
- ⇒ Pour le scénario RCP 2,6 dont on a déjà parlé, cette augmentation du niveau des mers serait réduite à quelques dizaines de centimètres jusqu'à 40 ou 50 cm à la fin du siècle.
- Enfin, dernière composante du système climatique que les modèles de systèmes Terre simulent ou projettent, ici l'évolution du cycle du carbone, les modèles systèmes Terre représentent de façon explicite les cycles du carbone, le cycle du carbone dans les réservoirs naturels que sont l'océan et la biosphère continentale.
- Vous avez ici deux exemples :
  - En haut à droite, l'évolution du pH de surface de l'océan qui, en fait, répond au fait que l'océan continue à absorber du carbone entropique.

## Changement climatique et augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique modifieront le fonctionnement de l'océan et de la biosphère continentale

IPCC, 2013



## Évolution du pH de l'océan de surface



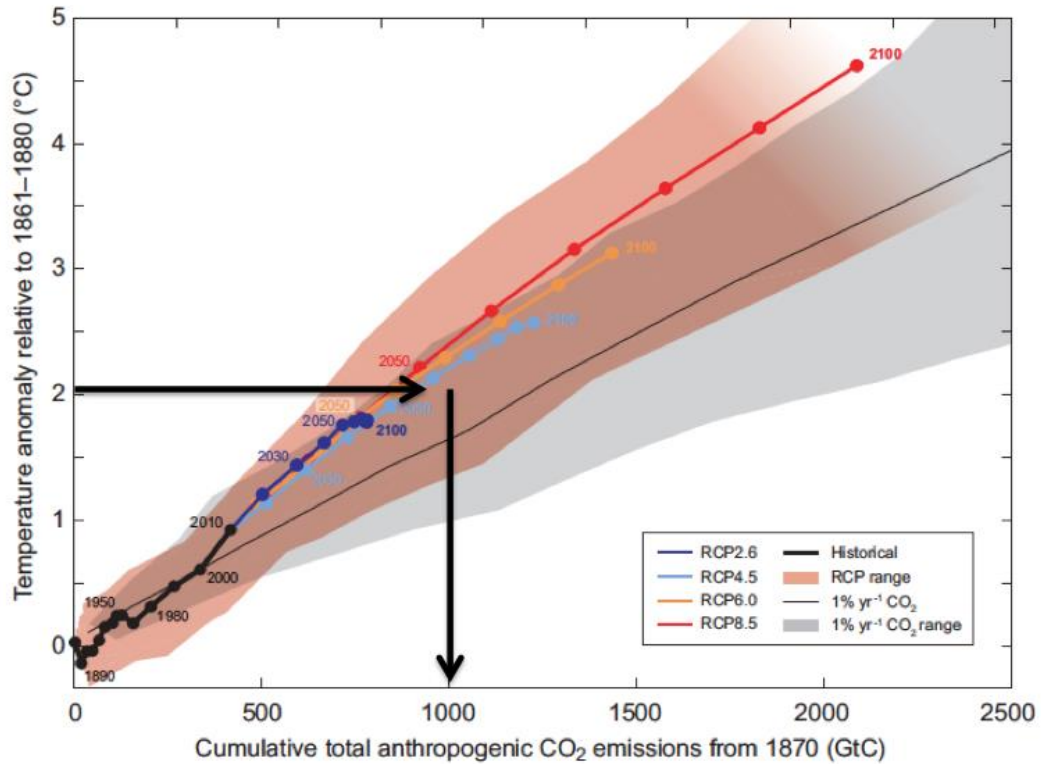
## Modification de la fraction de surfaces arborées entre 2100 et 2300 (RCP8.5)

- ⇒ Le CO<sub>2</sub> étant un acide faible, l'océan continue à s'acidifier en surface et on voit ici que le pH de l'océan pourrait perdre jusqu'à 0,4 unités pH d'ici 2100.
- Et sur la figure du bas, l'évolution des surfaces arborées entre 2100 et 2300 pour le scénario RCP 8,5 avec une diminution importante des surfaces arborées dans certaines régions du globe en réponse aux changements climatiques et la réédification de certaines zones.

Dernier point ici, grâce à la simulation du cycle du carbone et du système climatique couplé, les modèles système Terre en fait permettent d'établir une relation entre l'évolution des émissions de CO<sub>2</sub> anthropiques liées à la combustion des fiouls fossiles et l'augmentation de température.

- ⇒ Cette relation, démontrée par les modèles systèmes Terre est quasi linéaire.
- ⇒ Pour une émission cumulée de CO<sub>2</sub> anthropique depuis le début de la période industrielle, les modèles du système climatique projettent un réchauffement donné (ici en ordonné figure que vous avez sur la droite).
- ⇒ Cette figure assez simple permet de faire quelques constatations également assez simples : si on veut limiter l'augmentation de température à 2°C en moyenne globale, ce graphique nous indique que les émissions cumulées de carbone doivent être inférieures à à peu près 1000 milliards de tonnes de carbone.





⇒ Sachant qu'on a déjà émis à peu près 500 ou 550 milliards de tonnes de carbone, cela indique que pour limiter le réchauffement à 2°C, les modèles climatiques indiquent une limitation des émissions futures de CO<sub>2</sub> à à peu près 400 - 450 milliards de tonnes de carbone.

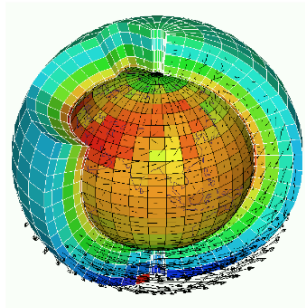
# La simulation du climat à l'échelle humaine

**Robert VAUTARD**

*Directeur de recherche – CNRS*

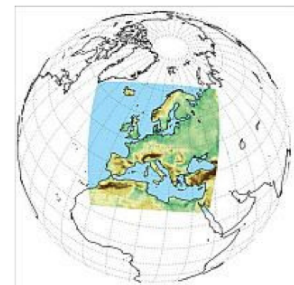
Le climat change et il devrait continuer à changer dans les décennies à venir. Or, pour bien comprendre les effets du changement climatique sur notre vie quotidienne, on a besoin de simuler les variables du climat à toute petite échelle. Dans cet exposé, je vais essayer de vous expliquer quelles sont les techniques pour y arriver.

- Alors, le premier problème que nous avons est que les modèles de simulation du climat sont des modèles qui tentent de simuler le climat à l'échelle du globe, avec l'atmosphère, l'océan, les surfaces terrestres et qui essaient surtout de bien simuler l'énergétique du système climatique.
- Mais pour cela, il a besoin de simuler l'ensemble du globe et dû aux problèmes de calculs numériques et de la limite en calcul numérique que nous avons, il est impossible de simuler tous les points du globe à la fois.
- Aujourd'hui, les modèles de climat simulent environ un point tous les 200 kilomètres. Or, c'est largement insuffisant pour simuler des phénomènes de petites échelles spatiales, comme les phénomènes orageux, les pluies intenses ou les tempêtes.



**Modèle global  
(résolution ~200 km)**

**Zoom &  
descente d'échelle**

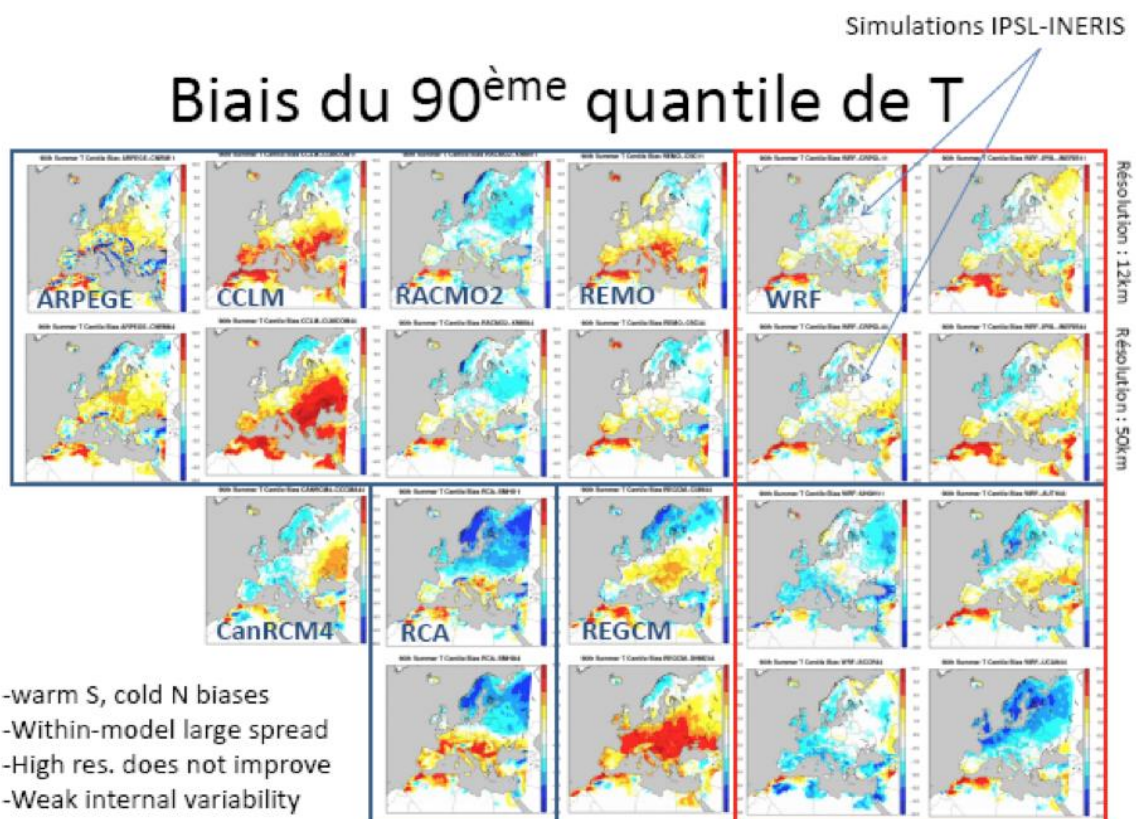


**Modèle régional  
(12 km)**

- ⇒ On a donc besoin d'avoir recours à une technique pour essayer de préciser un petit peu ces simulations à une échelle plus fine.
- ⇒ Alors, pour cela, pour éviter la surconsommation ou l'impossibilité de consommation en calcul numérique, on doit faire un compromis.

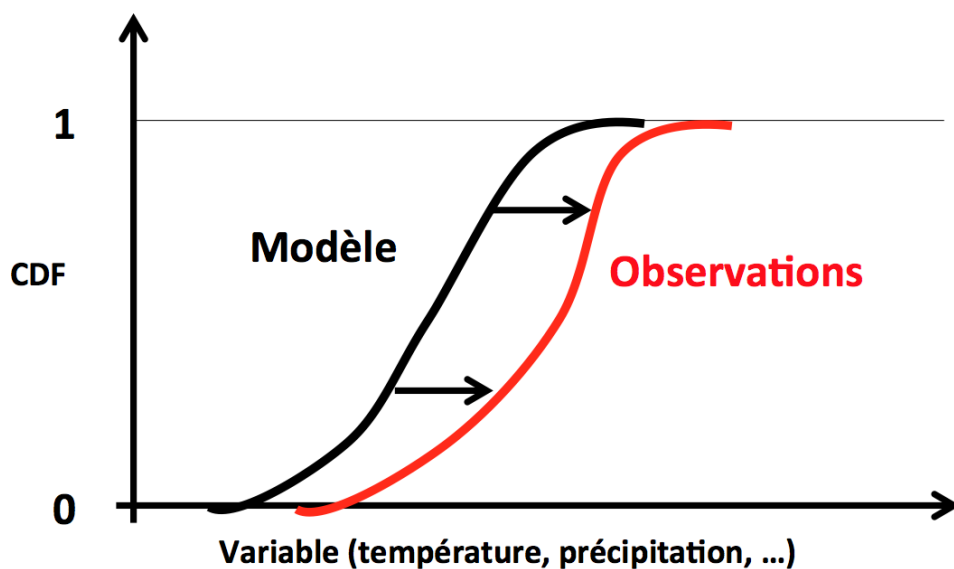
- Pour cela, on utilise un zoom, une méthode de zoom qui consiste finalement à ne simuler qu'une plus petite région, par exemple ici, on le voit dans la figure de droite, l'Europe, mais on n'essaye pas donc de simuler l'ensemble du globe avec ce modèle de climat.
- ⇒ Donc on fait en quelque sorte une incrustation et avec cette incrustation, on peut simuler un point environ tous les 10 ou 20 kilomètres, ce qui permet d'être beaucoup plus précis, notamment sur les effets liés au relief, les pluies par exemple que l'on voit dans les Cévennes, qui sont des pluies qui sont liées au relief des Cévennes que l'on ne peut pas voir dans les modèles de simulation globale, ou d'autres événements extrêmes comme des tempêtes ou des phénomènes liés eux aussi au relief comme les vents, comme le mistral etc.

Alors voilà, c'est un exercice qui a été fait par un ensemble de modèles, ici une vingtaine de modèles qui ont fait le même exercice de simulation du climat sur l'Europe à une échelle d'une dizaine de kilomètres et voilà un petit peu quelques résultats.



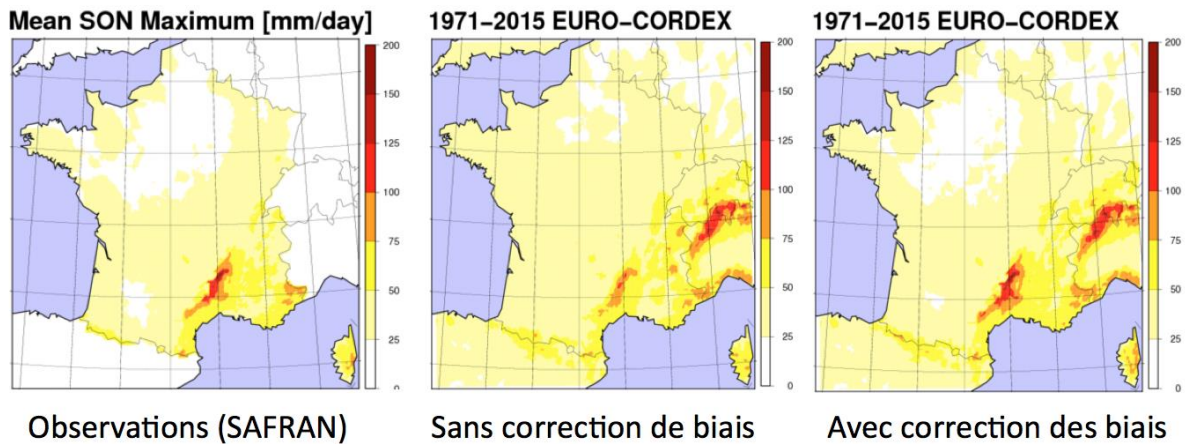
- Le premier concerne la température. En fait, ce que nous avons essayé de comparer, c'est si les fortes températures étaient bien représentées dans ces nouveaux modèles à très haute résolution.
- Alors, ce qu'on observe, sans regarder dans le détail, c'est que finalement, on voit que les températures près des reliefs sont un petit peu mieux simulées mais dans l'ensemble, on a des cartes qui représentent les biais de températures.

- ⇒ C'est-à-dire l'écart à la climatologie, en quelque sorte les erreurs du modèle et on voit qu'elles persistent et qu'elles persistent quand même à grande échelle.
- Alors, cela est dû à un ensemble de facteurs, notamment la bonne simulation de l'interaction entre l'atmosphère et la végétation et le sol et le cycle de l'eau, et qu'il est encore aujourd'hui difficile de simuler et même avec ces modèles de petite échelle, on n'arrive pas encore tout à fait bien à simuler les fortes températures.
- Alors, pour cela, on a quand même besoin de pouvoir prévoir les conséquences du changement climatique, donc on a recours à des techniques statistiques qui vont corriger les biais du modèle.



- ⇒ On prend un jeu d'observations, on prend les données du modèle et on va essayer de corriger les données du modèle avec des observations par des techniques statistiques assez avancées.
- Là, dans cette figure, nous représentons par exemple la courbe de distribution cumulée des températures (donc c'est la probabilité pour que la température soit inférieure à une valeur donnée- en abscisse -), et donc, on voit par exemple que le modèle a une température qui est trop basse par rapport aux observations.
- ⇒ Donc on va essayer de rapprocher ces deux courbes par une technique statistique avancée qui est aujourd'hui au cœur des développements de la recherche.
- Voilà, donc grâce à ces techniques, on arrive à mieux simuler les événements extrêmes.
- ⇒ Par exemple ici, on représente sur la figure de gauche les observations des pluies, des cumuls de pluies d'automne les plus importants en France, donc les maximales de cumul journalier de pluie en automne et on voit très bien se dégager la chaîne de montagnes des Cévennes dans lesquelles il pleut énormément et surtout les pluies sont

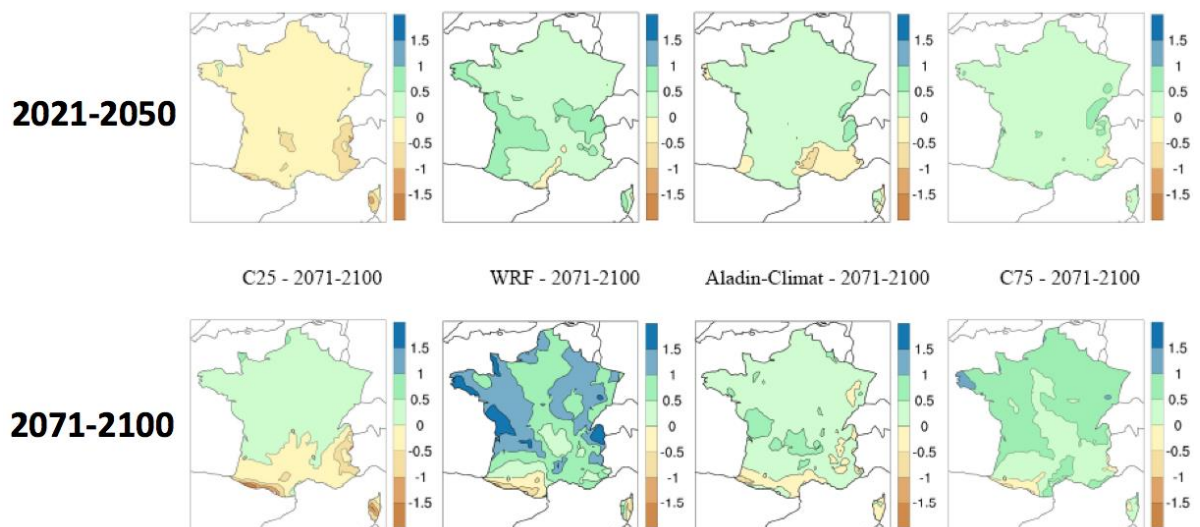
extrêmement intenses. Les pluies peuvent atteindre en cumul journalier la valeur annuelle des cumuls de pluie à Paris par exemple.



- Alors, les modèles dans la figure du milieu, représentent relativement bien la structure spatiale, mais ne sont pas assez intenses dans ces pluies, il pleut en quelque sorte deux fois moins que dans les observations.
- Grâce aux techniques de correction de biais des modèles, on arrive dans la figure de droite à mieux simuler les événements les plus forts.

Alors, c'est grâce à l'ensemble de ces techniques, les modèles globaux, les modèles régionalisés, les corrections statistiques, tous ensembles, que nous arrivons à simuler par exemple le climat sur la France au cours du XXI<sup>e</sup> siècle.

- Alors, dans ces figures qui sont le résultat d'une étude que nous avons faite avec Météo France, nous représentons les cumuls de pluie, l'écart des cumuls de pluie aux normales d'aujourd'hui pour une période future proche (2021 - 2050) et une période de futur lointain (la fin du siècle).
- Ce que l'on voit, c'est avec deux modèles (les deux modèles qui sont utilisés en France dans chacune des colonnes), ce que l'on voit c'est que les deux modèles prédisent une augmentation des précipitations au cours du XXI<sup>e</sup> siècle.
- Mais ce que l'on voit aussi, c'est qu'à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, les modèles donnent des valeurs très différentes.
- ⇒ Le modèle de gauche donnant des valeurs beaucoup plus fortes de l'augmentation des pluies que le modèle de droite.
- Donc, si on a une bonne vision du signe des changements à attendre, on a encore beaucoup d'incertitudes sur leur amplitude.



### Scénario RCP8.5

Alors, voilà, il reste encore énormément à faire dans la recherche pour pouvoir simuler correctement le climat de façon globale et jusqu'à toute petite échelle.

- La première chose est de mieux représenter le cycle de l'eau, les nuages dans les modèles, mais aussi l'interaction entre les variables du climat, la température, l'eau, et la chimie atmosphérique, les gaz à effet de serre.
- Enfin, il est absolument indispensable pour bien représenter notamment les vagues de chaleur et le climat de l'été, les interactions entre la surface terrestre, la végétation et l'atmosphère.

Voilà, ce sont les principaux défis qui sont devant nous et bien sûr à ces défis s'ajoutent d'autres défis de simuler correctement par exemple le climat dans une ville ou dans une petite vallée, donc des défis de toute petite échelle.