



CAUSES & ENJEUX DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Ce document contient la transcription textuelle d'une vidéo 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 modèles de climat

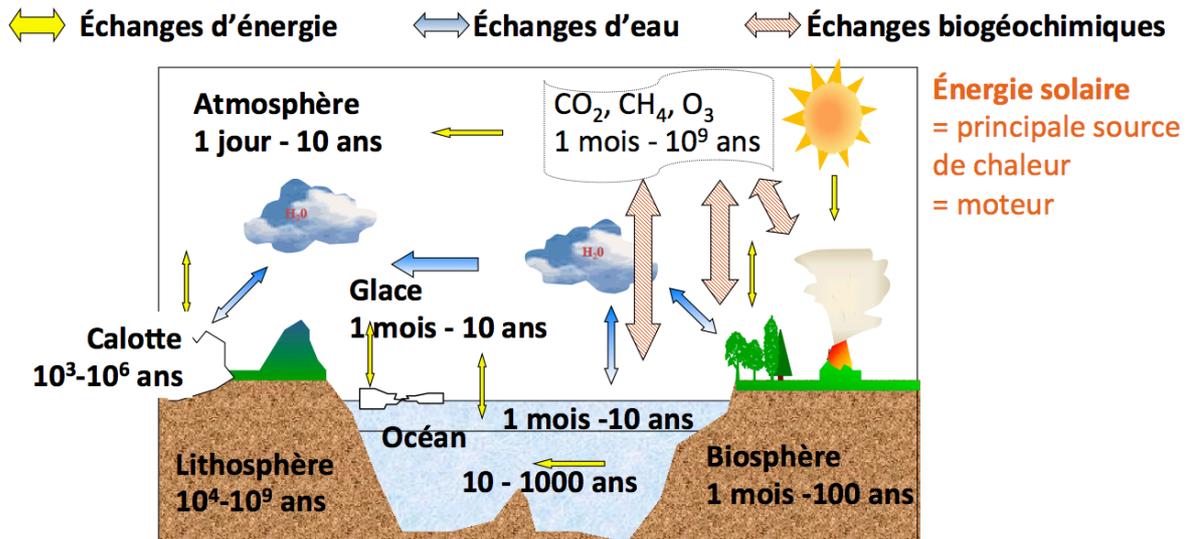
Pascale BRACONNOT

Chercheur – CEA

Nous allons voir dans cette vidéo comment modéliser le climat. Mais il faut d'abord connaître le système à représenter.

- Donc le climat est le résultat d'interactions entre de nombreux réservoirs ayant des échelles de temps très différentes.
- L'atmosphère, où se passe la météorologie a des échelles de temps très courtes allant jusqu'à une dizaine d'années.
- Ce qui module le climat, ce sont ces interactions entre l'atmosphère et des réservoirs aux échelles de temps plus longues, comme l'océan ou les surfaces continentales.
- ⇒ Ces échelles allant du cycle saisonnier à la variabilité interannuelle et millénaire, voire au-delà.
- Le moteur du climat est l'énergie incidente du Soleil au sommet de l'atmosphère, et l'atmosphère et l'océan sont les deux composantes qu'il faut absolument avoir dans un modèle de climat pour pouvoir représenter les transports et la redistribution de cette énergie solaire entre les régions équatoriales et les pôles.

Le système à représenter



Alors, un modèle numérique de climat, c'est en fait une somme de modèles.

- C'est qu'à partir des observations et de la réalité, il faut formaliser le problème physique sous forme d'équations mathématiques, c'est donc le modèle mathématiques que l'on va employer.
- Ensuite, on va faire intervenir une discrétisation et on va faire intervenir un modèle numérique et ce modèle numérique devra respecter des lois de conservation, par exemple de l'énergie ou de la masse dans le système.
- Ensuite, on va avoir ce que l'on appelle le code, qui est l'ensemble des programmes numériques qui vont être donnés à l'ordinateur pour effectuer l'ensemble des calculs.
- Donc, avoir un modèle de climat, c'est aussi prévoir tout l'environnement du travail au niveau de l'ordinateur pour suivre les simulations et être capable de les exploiter.

Alors, si l'on reprend les modèles, le système d'équation que l'on utilise est issu de la mécanique des fluides en milieu tournant et fait appel aux équations de NAVIER-STOKES auxquelles on applique quelques hypothèses simplificatrices comme le fait que la Terre est ronde et le niveau d'hypothèse dépend un petit peu des différents modèles.

- Alors, ces modèles sont appelés modèles de circulation générale et j'ai mis ici les équations d'un modèle d'atmosphère.

Equations de GCM atmosphérique (extraits)

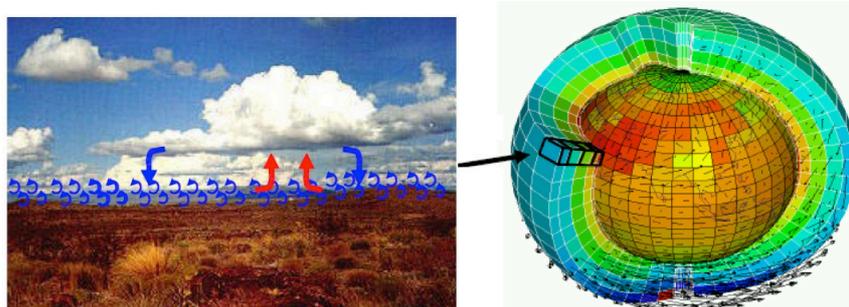
Equations dynamiques en coordonnées pression

$$\begin{cases} \partial_t \vec{V} = \underbrace{-(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V}}_{\text{transport}} - \underbrace{\omega \partial_p \vec{V}}_{\text{gravité}} - \underbrace{-\nabla \Phi}_{\text{Coriolis}} - \underbrace{f \vec{k} \times \vec{V}}_{\text{Coriolis}} + \vec{S}_v \\ \nabla \cdot \vec{V} + \partial_p \omega = 0 \\ \partial_t q = -\vec{V} \cdot \nabla q - \omega \partial_p q + S_q \end{cases} \quad \begin{cases} \Phi = gz & \text{geopotentiel} \\ \omega = \partial_t p & \text{vitesse vert.} \\ q = \text{humidité spécifique} \end{cases} \quad (1)$$

\vec{S}_v et S_q : termes source déterminés par les **paramétrisations physiques**:

Mécanique des fluides en milieu tournant (Navier-Stokes)
Hypothèses : terre ronde, épaisseur atmosphère petite / rayon,
équilibre hydrostatique , gaz parfait

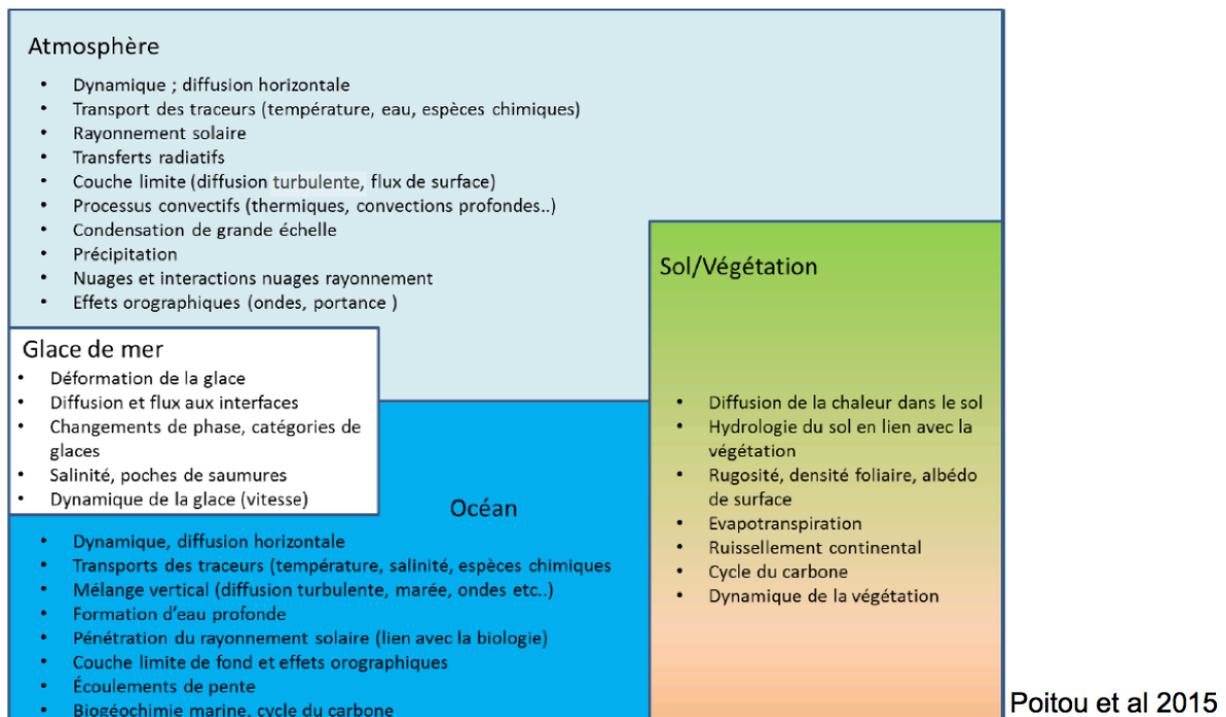
- Ils font intervenir les équations du mouvement et les équations d'états.
- Donc les variables de base, que l'on va utiliser, ce sont le vent, la température, l'humidité, et ces équations, par exemple les équations du mouvement font intervenir des termes de source et de puits d'énergie qu'il faut représenter.
- En milieu tournant également, va intervenir la force de Coriolis qui est responsable des grandes variations de la circulation atmosphérique et océanique.
- Alors, avoir un modèle, c'est ensuite être capable d'avoir un maillage sur lequel on va résoudre ces équations et donc on va découper la Terre, la planète, en somme de petits cubes, c'est un maillage tridimensionnel, avec une discrétisation sur l'horizontale et sur la verticale.



Niveau de complexité variable d'un modèle à l'autre

- Ensuite, représenter le climat c'est un compromis entre la représentation en termes d'espace et de temps de simulation, il va falloir représenter tous les phénomènes qui sont aux échelles sous-maille.
- ⇒ Par exemple, pour le climat, on travaille avec des échelles de l'ordre de 200 km.

- Il va falloir donc développer ce que l'on appelle des paramétrisations pour représenter cette physique sous-maille et ça consiste à utiliser les variables de grande échelle pour représenter tous les processus de petite échelle, comme ici l'exemple des nuages qui sont sur cette figure.
- Alors, ce qui diffère beaucoup d'un modèle à l'autre, ça va être le niveau de complexité des différentes paramétrisations que l'on introduit dans les modèles.

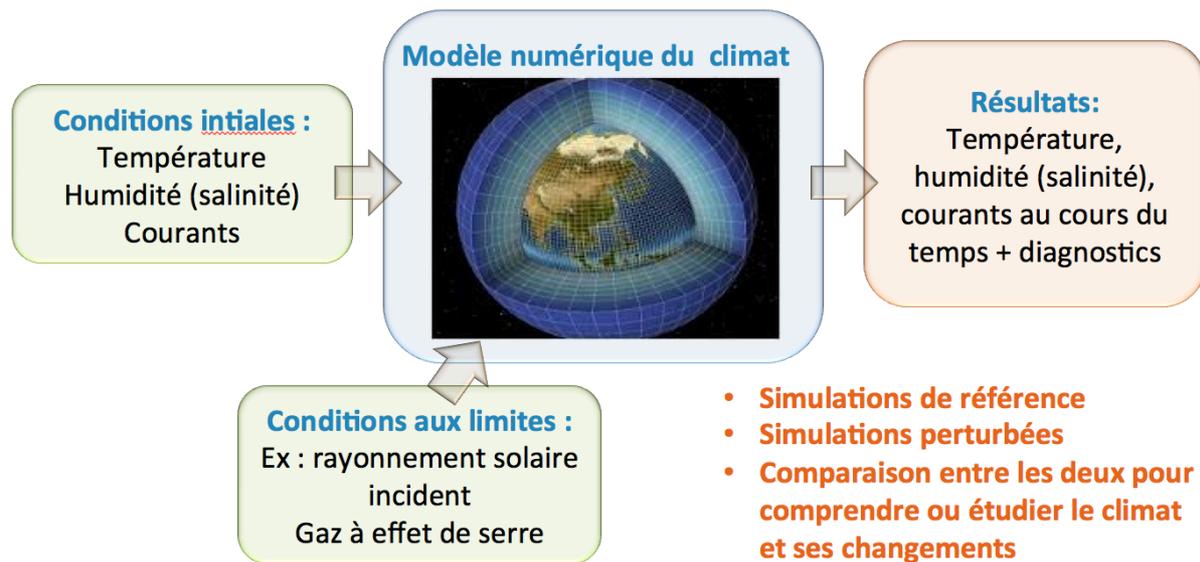


Alors, je l'ai dit, il y a énormément de réservoirs concernés et de processus dans la représentation des modèles de climat, et donc j'ai parlé de l'atmosphère et des nuages, mais dans les modèles d'atmosphère, on va aussi représenter toutes les caractéristiques du rayonnement dans l'atmosphère :

- la formation des gouttes de pluie et des précipitations ;
- la végétation (on va avoir tout le changement des feuilles au cours de la saison) ;
- les échanges d'eau avec le sol ;
- l'océan, on va avoir les mouvements marins et le mélange vertical ;
- et la glace de mer, également, avec sa grande réflectivité et puis les transferts de chaleur au travers de la glace et les mouvements de la glace sur l'océan.

Alors, ce que l'on appelle une expérience numérique, ce sont donc la somme des simulations que l'on fait pour répondre à une question que l'on se pose sur le climat.

Mais pour pouvoir utiliser les modèles dont je viens de vous parler, il faut leur prescrire, pour réaliser une simulation, en tous les points de la grille, des conditions initiales.



⇒ C'est-à-dire que l'on va imposer aux modèles des conditions de température, d'humidité et de vent ou de courants océaniques caractéristiques d'un état de démarrage ou d'un jour dans l'année, d'un jour particulier dans l'année.

➤ Au cours de la simulation, on va faire varier ce que l'on appelle les conditions aux limites.

⇒ C'est par exemple le rayonnement incident au sommet de l'atmosphère ou la composition des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, ou éventuellement, l'évolution des surfaces continentales en fonction de l'activité humaine.

➤ Le résultat de la simulation va nous donner un ensemble de fichiers informatiques qui nous donneront en chaque point de cette grille du modèle et pour chacun des réservoirs, l'évolution au cours du temps des températures, de l'humidité, des courants, et un ensemble de diagnostics qui va nous permettre d'exploiter ces simulations.

Alors, lorsque que l'on parle de climat, généralement, la façon de procéder consiste à faire une première simulation qui est une simulation de référence, par exemple la simulation du climat actuel, puis une deuxième simulation d'un climat perturbé dans lequel, au cours de la simulation, on va changer un élément.

⇒ Par exemple, on va faire varier au cours du temps la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, par exemple faire évoluer la composition en gaz carbonique de 1 % par an au cours de la simulation jusqu'à ce qu'elle se stabilise.

Et c'est en comparant les résultats de ces deux simulations que l'on va pouvoir comprendre le fonctionnement du système climatique et comment il réagit à cette perturbation, et donc étudier le climat et les changements climatiques.

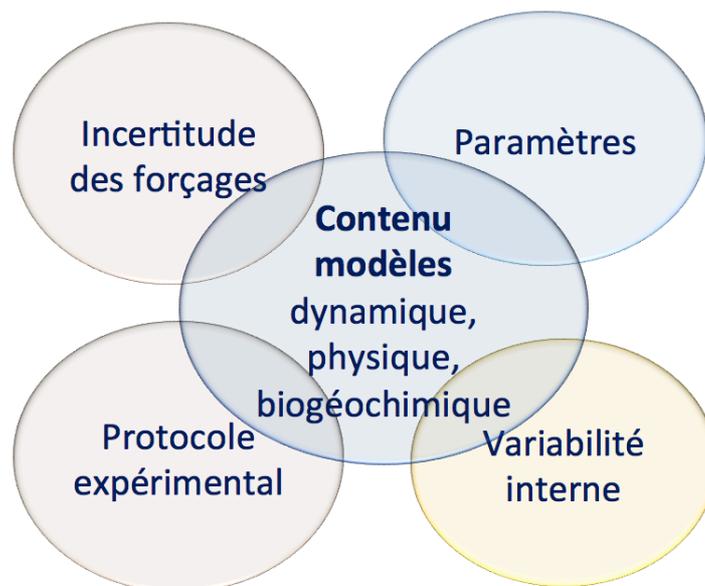
Evaluation des modèles climatiques

Pascale BRACONNOT

Chercheur – CEA

Nous allons voir dans cette vidéo comment on assure la crédibilité des résultats des modèles de climats qui sont utilisés pour les projections climatiques futures.

- Alors, il faut savoir avant tout qu'il y a plusieurs facteurs qui vont affecter les résultats des modèles, ça passe dans le contenu lui-même des modèles et la façon dont les équations sont représentées, donc la dynamique, la physique, toutes les interactions avec les cycles biogéochimiques mais ce n'est pas tout, dans les paramétrisations physiques on fait intervenir un certain nombre de paramètres qu'il faut définir et que l'on ajuste afin d'avoir des interactions correctes entre tous les éléments du système.



- ⇒ Les petites variations de ces paramètres peuvent éventuellement affecter les résultats.
- De la même manière, faire une simulation, c'est imposer des conditions limites et des perturbations externes que l'on appelle forçage et qui ont aussi leurs propres incertitudes et qui peuvent donc aussi affecter les résultats.
- La façon dont on mène une expérience, le protocole, la façon dont on implémente les forçages dans les simulations peuvent aussi différer d'un modèle à l'autre et affecter donc les résultats.
- Le phénomène assez intrinsèque au climat est tout ce qui est lié à la variabilité et suivant ce que l'on regarde, cette variabilité introduit du bruit et ne facilite pas la comparaison aux observations et il faut en tenir compte dans les comparaisons modèles/ données.

⇒ Donc c'est pour ça que l'on développe des évaluations à différents niveaux en s'intéressant aux climatologies et aussi à la capacité des modèles à reproduire un climat différent de l'actuel.

Alors, la première évaluation de base, c'est de s'intéresser à savoir si les climatologies représentées par les modèles sont réalistes ou non en comparant aux nombreuses observations disponibles et on peut faire appel à des tas de résultats de campagnes de mesures sur le terrain ou alors aux données satellites.

➤ Vous avez un exemple ici par les températures de surface et la carte de gauche vous représente les températures de surface en moyenne annuelle représentées par un ensemble de modèles, c'est la moyenne d'ensemble des modèles et ça reproduit très bien, en premier ordre, les observations.

⇒ On aurait une carte très similaire avec les observations.

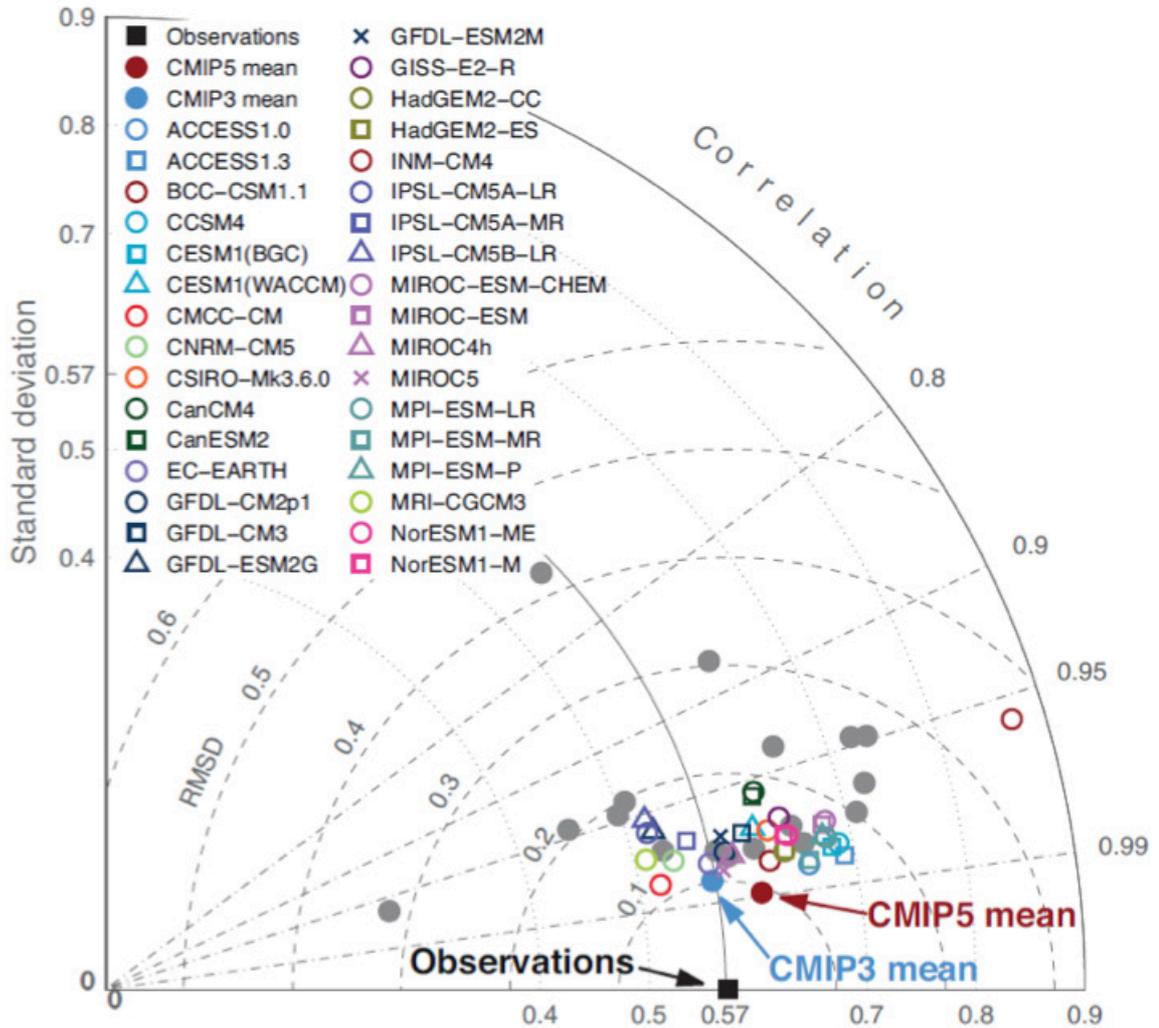
➤ Néanmoins, si on fait la différence entre les résultats simulés à droite et les observations, on voit que les modèles ont tendance à être un petit peu trop froids dans l'hémisphère nord et trop chauds dans l'hémisphère sud, l'hémisphère sud plutôt sur les océans.

➤ Alors, on a la confirmation, si on regarde en moyenne zonale en fonction de la latitude sur la carte de gauche, les différences de températures de la mer simulées et observées et on voit bien sur cette carte que l'on a des simulations trop chaudes dans l'hémisphère Nord et trop froides dans l'hémisphère Sud et on voit aussi une grande disparité entre les résultats des modèles.

➤ On voit aussi ça le long de l'Équateur, sur la figure de droite, où vous avez au centre l'océan Pacifique, à gauche l'océan Indien et à droite l'océan Atlantique et si on prend à gauche, on voit que tous les modèles ont tendance à petit peu trop de froid dans l'océan Pacifique, mais on voit aussi que certains modèles ont des variations complètement différentes de l'ensemble des modèles en étant trop chauds sur le bassin et particulièrement à l'Est.

⇒ Donc on met comme ça en évidence des comportements communs et des comportements spécifiques à certains modèles.

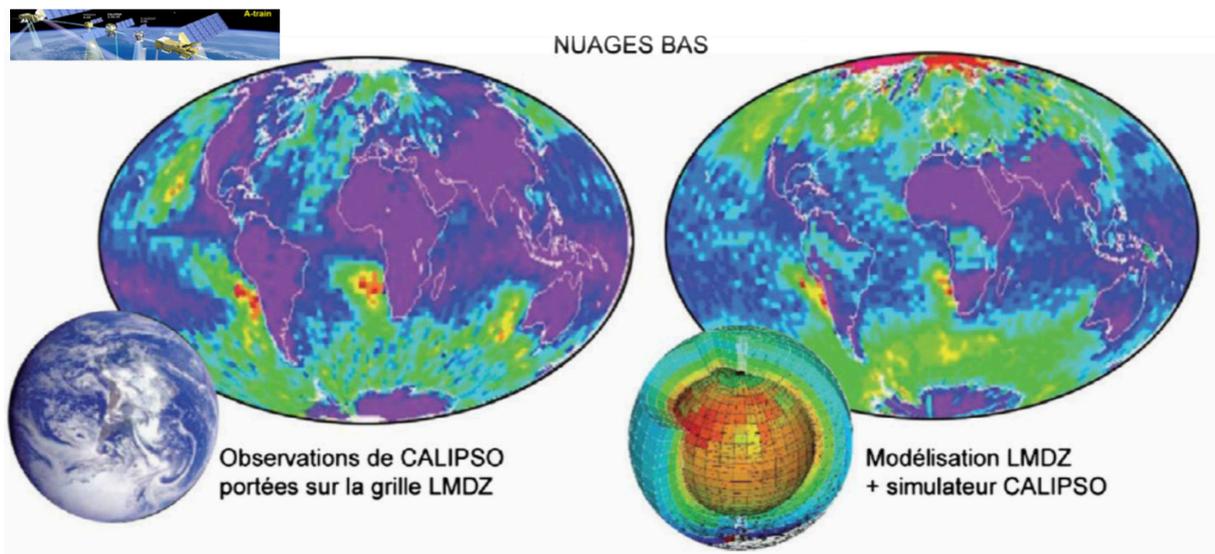
➤ Alors ce qu'on aime bien aussi, c'est être capable de caractériser très rapidement ces résultats et de savoir si certains modèles sont meilleurs que d'autres ou si les modèles évoluent dans le temps et pour cela, on a recours au diagramme de Taylor.



- ⇒ Donc ce diagramme sur l'axe du bas va nous représenter l'amplitude du signal simulé, sur l'arc de cercle on va avoir une mesure de la corrélation entre ce qui est simulé et ce qui est observé, et puis, lorsque l'on compare le point observé, la distance entre le point observé et n'importe lequel des points sur la carte, donc un des points, on va avoir la différence quadratique moyenne qui va donner un écart d'amplitude entre ce qui est simulé et ce qui observé.
- ⇒ Donc plus on est proche du point des observations, meilleurs on est, plus on est loin, moins bons on est et ce diagramme nous permet de savoir si c'est parce que la corrélation est bonne entre modèles et observations ou alors si c'est l'amplitude du champ qui est mal simulée.
- On voit par exemple ici, si on prend ce qui est marqué CMIP 5 ou CMIP 3 qui sont deux grands ensembles de simulations, on voit que ces deux grands ensembles de modèles ont à peu près le même type de qualité par rapport aux observations.

Alors, souvent ce que l'on modélise, n'est pas directement comparable aux observations.

- Alors c'est le cas par exemple des nuages qui sont des structures de très fine échelle, que l'on représente dans les modèles et que l'on peut maintenant comparer à de nombreuses données satellites.
- Alors, les nuages observés par satellite n'ont pas exactement les mêmes caractéristiques que l'on simule et pour ça, on va développer des petits logiciels pour pouvoir les comparer, qui font comme si un satellite volait dans le modèle et regarde les nuages et les mesure et on va ainsi pouvoir mieux comparer les couvertures nuageuses.

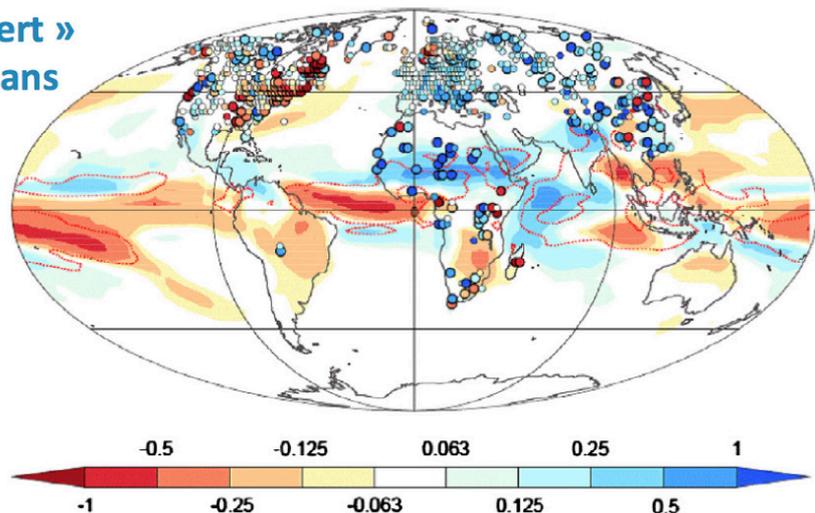


- ⇒ Ce que montre la comparaison de ces deux cartes (vous avez à gauche le résultat des satellites et à droite les résultats des modèles), c'est que ce modèle particulier a tendance à avoir des couvertures nuageuses (donc c'est en jaune sur la figure), qui sont plus importantes dans les moyennes latitudes de l'hémisphère nord et de l'hémisphère sud que ce qui est représenté dans les observations dans les mêmes régions.
- ⇒ Donc on met là en évidence un défaut dans la représentation des nuages bas dans ce modèle.

Alors, pour savoir aussi si un modèle est capable de simuler un climat différent de l'actuel, on peut utiliser de nombreuses expériences menées par la Terre dans les climats passés.

- Donc on utilise aussi les paléoclimats comme tests de notre capacité à représenter ces climats différents et un exemple donné ici pour le climat d'il y a 6000 ans, où j'ai mis sur la figure une reconstitution des précipitations annuelles en millimètres par an qui sont donnés par les petits points.

Période du « Sahara vert » Pluies annuelles 6000 ans BP – Actuel

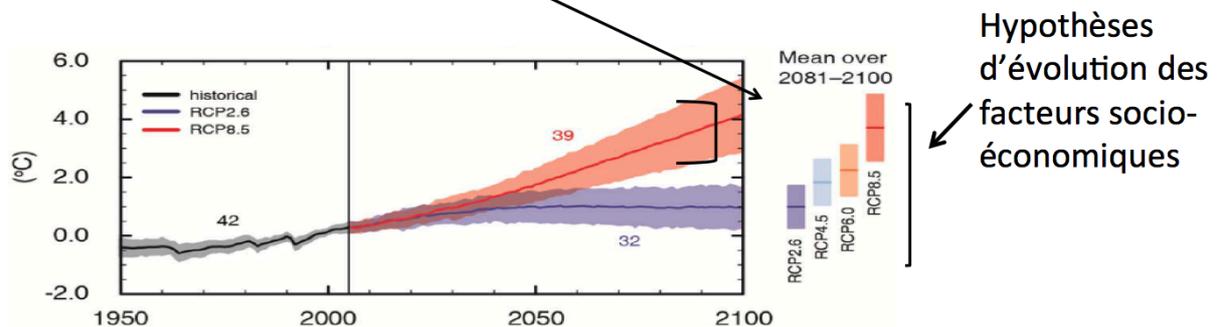


- ⇒ Quand c'est bleu c'est-à-dire qu'il y avait plus de précipitations ;
- ⇒ Quand c'est rouge, ça veut dire qu'il en avait moins là où on avait des données.
- Ce que vous avez sur la carte c'est la moyenne d'un ensemble de modèles, la différence à la période actuelle, pour cette période.
- ⇒ Lorsque c'est bleu, c'est qu'il y avait plus de précipitations ;
- ⇒ Lorsque c'est rouge, c'est qu'il y a moins de précipitations dans les modèles.
- Alors, cette époque est marquée par une variabilité saisonnière plus importante du rayonnement solaire dans l'hémisphère nord et ça, ça induisait des moussons beaucoup plus intenses et c'est pour ça qu'il y a plus de pluies par exemple dans toute la région du Sahara et du Sahel sur cette carte.
- Ce que vous voyez aussi, c'est que si l'on compare les résultats des modèles et des données par les petits ronds de couleur, on voit qu'au premier ordre, les modèles représentent très bien les variations observées, mais lorsque l'on regarde de plus près et si l'on va plus loin dans les analyses, on se rend compte qu'ils ont un petit peu tendance à sous-estimer l'amplitude des changements observés.
- ⇒ Donc les modèles sont satisfaisants et tout à fait crédibles sur leurs grandes lignes et ont quand même des défauts dans la représentation – par exemple pour ce climat -, de l'amplitude des précipitations.

Alors, grâce à ces différentes évaluations, on est aussi capables de mieux caractériser les incertitudes des projections climatiques comme celles que l'on fait pour le prochain siècle.

- Donc vous avez sur cette figure les résultats pour les ensembles de modèles de changements de température en moyenne annuelle pour l'ensemble de la planète, en fonction du temps.

Barre d'erreur estimée à partir de 39 simulations (modèles) : tient compte des différences entre modèles, de la nature chaotique du climat



- Donc on représente la partie 1950 à 2000, c'est le climat actuel, et ensuite, on fait des simulations avec différentes hypothèses de l'évolution socio-économique et donc des émissions de gaz à effet de serre.
- ⇒ Dans des cas où il n'y a pas de mesures qui sont prises, c'est le paquet rouge et dans le cas où des mesures sont prises pour les réductions des émissions, c'est le paquet bleu.
- Cet ensemble de modèles et les comparaisons nous permettent de caractériser les incertitudes liées à la modélisation, donc c'est les barres d'erreur autour des projections pour chacune des couleurs, chacun des paquets.

Mais lorsque l'on s'intéresse aux changements climatiques, les erreurs, les incertitudes provenant des modèles ne sont pas la seule source d'incertitude à prendre en compte, il faut aussi prendre en compte des incertitudes d'autres natures qui font appel aux résultats d'autres communautés, comme par exemple ici, les hypothèses qui sont faites sur l'évolution des facteurs socio-économiques et qui caractérisent les paquets rouges et bleus à l'horizon 2100.

C'est grâce à l'ensemble et la prise en compte de l'ensemble de ces incertitudes que l'on est capables de mieux caractériser les risques pour la société du changement climatique en cours.