



## VOIE GÉNÉRALE

2<sup>DE</sup>

1<sup>RE</sup>

T<sup>LE</sup>

Enseignement scientifique

ENSEIGNEMENT

COMMUN

# MODÉLISATION NUMÉRIQUE ET PROJECTIONS CLIMATIQUES

Une ressource produite  
en partenariat avec  
[l'Office for Climate  
Education](#)



### Mots-clés

Modèles climatiques, projections, changement climatique

### Références au programme

#### Thème 1 – Science, climat et société

#### 1.3- Le climat du futur

##### Savoirs

Les modèles climatiques s'appuient sur :

- la mise en équations des mécanismes essentiels qui agissent sur le système Terre ;
- des méthodes numériques de résolution.

Les résultats des modèles sont évalués par comparaison aux observations in situ et spatiales ainsi qu'à la connaissance des paléoclimats.

Ces modèles, nombreux et indépendants, réalisent des projections climatiques. Après avoir anticipé les évolutions des dernières décennies, ils estiment les variations climatiques globales et locales à venir sur des décennies ou des siècles.

L'analyse scientifique combinant observations, éléments théoriques et modélisations numériques permet aujourd'hui de conclure que l'augmentation de température moyenne depuis le début de l'ère industrielle est liée à l'activité humaine.

Les modèles s'accordent à prévoir, avec une forte probabilité d'occurrence, dans des fourchettes dépendant de la quantité émise de GES :

- une augmentation de 1,5 à 5° C de la température moyenne entre 2017 et la fin du XXI<sup>e</sup> siècle ;
- une élévation du niveau moyen des océans entre le début du XXI<sup>e</sup> siècle et 2100 pouvant atteindre le mètre ;
- des modifications des régimes de pluie et des événements climatiques extrêmes.

##### Savoir-faire

- Identifier les relations de causalité (actions et rétroactions) qui sous-tendent la dynamique d'un système.
- Exploiter les résultats d'un modèle climatique pour expliquer des corrélations par des liens de cause à effet.

Retrouvez éducol sur



## *Pourquoi simuler numériquement le climat ?*

Depuis 150 ans, la température globale de la Terre a augmenté d'environ 1° C. Ce réchauffement est-il lié à l'augmentation de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre émis par les activités humaines ? Pour répondre à cette question selon la démarche expérimentale classique, il faudrait dupliquer notre planète, lui faire remonter le temps 150 ans plus tôt, et la laisser évoluer jusqu'à nos jours sans émettre de gaz à effet de serre, tout en accélérant le temps pour obtenir les résultats rapidement. C'est impossible, on n'a qu'une seule Terre... De même, de combien le climat se réchauffera-t-il si on double la concentration en gaz à effet de serre ? Pour répondre à cette question, il faudrait dupliquer notre planète, doubler la concentration en CO<sub>2</sub>, et accélérer le temps jusqu'en 2100 pour obtenir les résultats rapidement. C'est également impossible.

Pour tester des hypothèses, quantifier l'importance de différents mécanismes ou anticiper le climat futur, on a donc recours à des **expériences virtuelles** par le biais de la **modélisation**.

Le climat est un système très complexe, mettant en interaction de nombreuses composantes : l'atmosphère, l'océan, les surfaces continentales, les glaces. Chacune de ces composantes est elle-même très complexe, avec de nombreux processus en jeu ; par exemple, dans l'atmosphère : les vents, le cycle de l'eau... Face à une telle complexité, la modélisation doit être **numérique**. On utilise ce qu'on appelle des **modèles numériques du climat**.

## *Comment fonctionne un modèle numérique du climat ?*

Un modèle numérique du climat est un imposant programme informatique qui simule les différentes composantes du système climatique : l'atmosphère, l'océan, les surfaces continentales, les glaces (figure 1). On peut citer le modèle de l'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace), qui compte près d'un million de lignes de codes et nécessite le travail d'une centaine de chercheurs et ingénieurs depuis des dizaines d'années. Le programme informatique retranscrit sous forme numérique des milliers d'**équations physiques**. Par exemple, la composante atmosphérique des modèles de climat résout numériquement les équations de la mécanique des fluides. L'atmosphère terrestre est divisée en des milliers de petits pavés ou « pixels » appelés mailles, d'environ 100 km de côté sur l'horizontale et quelques centaines de mètres sur la verticale. Les processus dont la taille est inférieure à la maille, tels que les nuages, la pluie ou le rayonnement, sont représentés par ce que l'on appelle des paramétrisations physiques. Ces paramétrisations physiques peuvent notamment calculer la proportion de la vapeur d'eau qui se condense pour former des nuages.

Dans chacune des millions de mailles de notre atmosphère simulée, on calcule toutes les variables météorologiques, toutes les quelques minutes, comme le font les modèles de prévision météorologique. Mais, tandis que les modèles de prévision météorologique calculent ces variables sur quelques jours à semaines, les modèles de climat les calculent sur des centaines à des milliers d'années ! Par exemple, pour une simulation de 100 ans, avec un pas de temps de 10 minutes, des mailles de 100 km de côté en horizontal et un empilement vertical de 80 mailles, chaque équation est résolue 100 ans x 365 jours/an x 144 pas/jour x 200 mailles en latitude x 400 mailles en

longitude x 80 mailles en altitude = **33 000 milliards de fois** ! On comprend donc que, même si les modèles de climat tournent sur des **ordinateurs** très puissants (figure 2), la puissance de calcul est un facteur limitant. Ainsi, pour simuler 150 ans de climat, le programme tourne en continu sur le supercalculateur pendant plusieurs semaines.

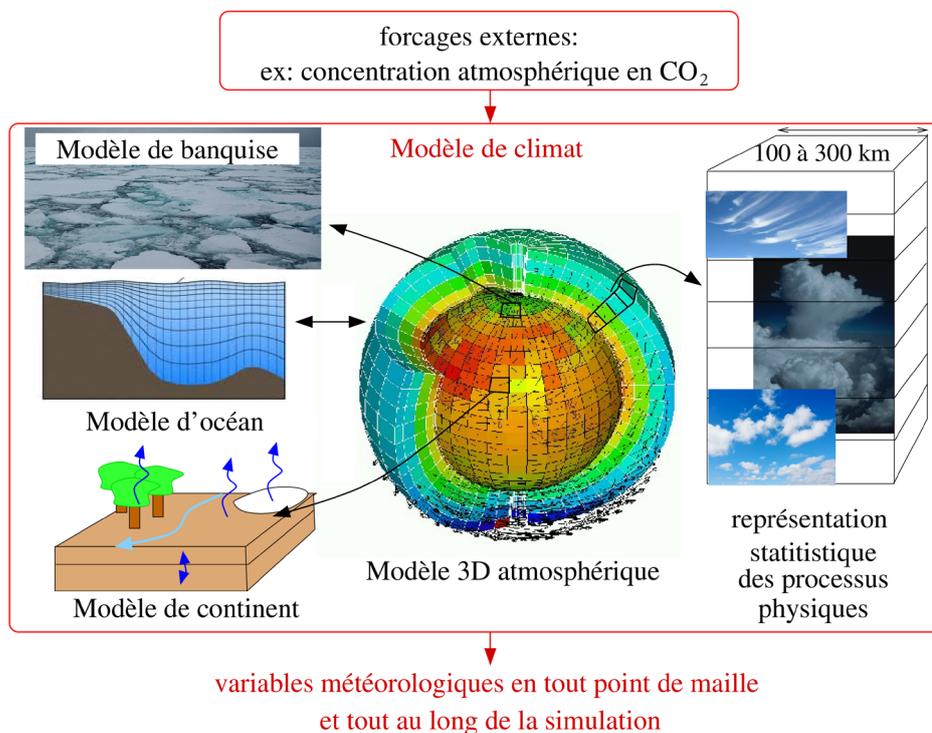


Figure 1 : la structure d'un modèle numérique de climat, couplant les différentes composantes du système climatique.



Figure 2 : le supercalculateur Curie au très grand centre de calcul du commissariat à l'énergie atomique, où tournent de nombreuses simulations climatiques.

Retrouvez éducol sur



Les équations physiques sur lesquelles les modèles sont fondés contiennent souvent des **paramètres dont la valeur n'est pas exactement connue**. Par exemple, quel est le rayon moyen des cristaux de glace dans les nuages cirrus ? Ces paramètres sont ajustés par comparaison avec des observations, par exemple des **observations collectées lors de campagnes de terrain ou des données satellitaires**.

Pour autant, est-il possible d'ajuster les modèles de climat pour leur faire simuler ce qu'on veut ? Par exemple, un scientifique pourrait-il, dans un objectif militant, « truquer » un modèle pour qu'il produise dans le futur un réchauffement climatique particulièrement élevé ? Non, car le même modèle de climat est aussi utilisé pour simuler le climat présent, des climats passés, et même le climat d'autres planètes. Ainsi, bien malin qui saurait « truquer » un modèle tout en le validant par rapport à des climats aussi variés et à des observations aussi multiples.

## Les projections climatiques

### Notions de projection et de scénario

Les modèles numériques peuvent être utilisés pour anticiper le changement climatique à venir. Mais celui-ci dépend du comportement futur des humains et des mesures prises pour limiter ou non les émissions de gaz à effet de serre. Ce comportement et les choix de société liés ne sont pas prévisibles. On ne peut donc pas réaliser de « prévisions climatiques ». On élabore plutôt différents **scénarios** de concentrations en gaz à effet de serre, qui correspondent à différentes trajectoires d'émission de CO<sub>2</sub> résultant de différents choix de société (figure 3). Les modèles de climat simulent alors l'évolution du climat résultant de chaque scénario. On appelle cela des projections climatiques.

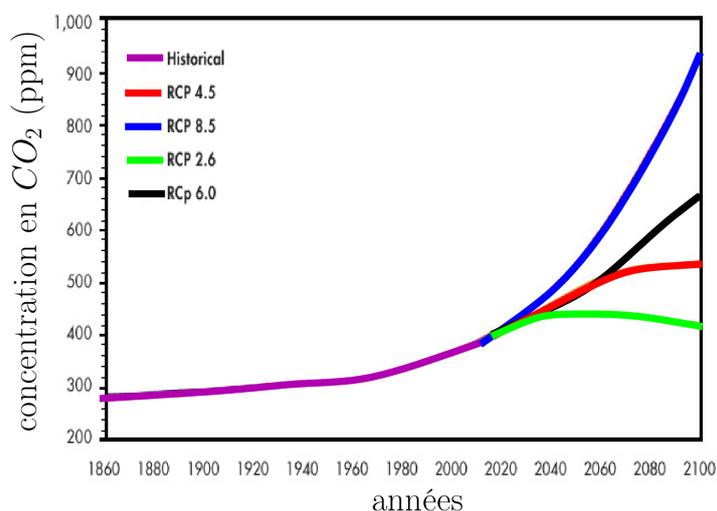


Figure 3 : scénarios d'évolution de concentration en CO<sub>2</sub> utilisés par le GIEC (RCP : « Representative Concentration Pathway »).

## Résultats robustes des modèles de climat

Il existe dans le monde une **centaine de modèles de climat**, issus de quelques dizaines de groupes de recherche, dont deux français. Ils réalisent tous les mêmes simulations selon le même protocole dans le cadre du programme international **CMIP** (coupled model intercomparison project). Par exemple, tous les modèles réalisent des simulations jusqu'en 2100 selon les différents scénarios de la figure 3. Les résultats des simulations sont accessibles à tous gratuitement. Ils alimentent les rapports du **GIEC** (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) qui paraissent tous les 7 ans environ.

Grâce à ces simulations, on peut identifier des résultats pour lesquels tous les modèles s'accordent. Par exemple, selon tous les modèles, si la concentration en CO<sub>2</sub> augmente dans l'atmosphère, la Terre se réchauffe (figure 4a), le niveau de la mer augmente (figure 4b), ou la pluie diminue sur le pourtour méditerranéen, aggravant le risque de sécheresses, et augmente dans les régions équatoriales, aggravant le risque d'inondations (figure 4c). La fréquence et l'intensité des vagues de chaleurs augmentent. On dit que ces résultats sont **robustes**.

Notre confiance dans ces résultats vient de l'accord entre les modèles de climat, mais aussi du fait que l'on **comprend bien les mécanismes physiques** en jeu. On a d'autant plus confiance que ces mécanismes reposent sur de la physique simple et fondamentale, et que des modèles de complexité variées, d'une simple équation au modèle de climat, s'accordent sur le même résultat.

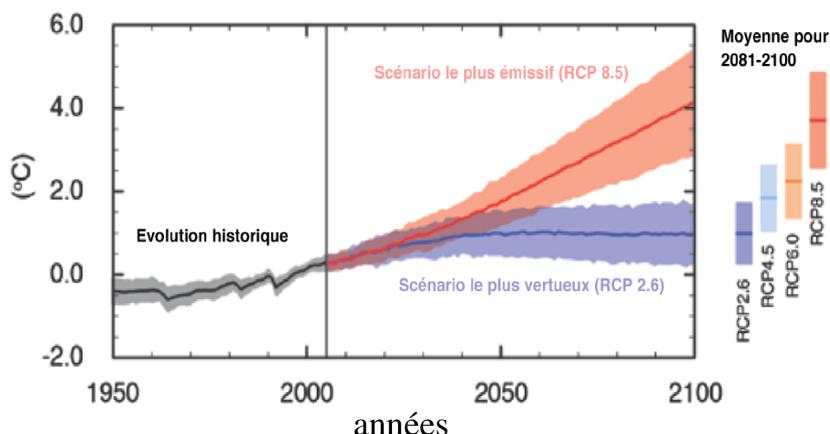
## Résultats moins robustes des modèles de climat

Certains aspects des projections climatiques suscitent moins de certitude et de confiance. Par exemple, l'augmentation exacte de la température globale varie entre +3° C et +6° C pour le scénario le plus émetteur (figure 4a). Pour ce même scénario, l'augmentation simulée du niveau des mers varie entre +0,5 m et +1 m. Les modèles sont aussi en désaccord sur les changements de pluie dans les régions de mousson (figure 4c). Ces désaccords existent parce que les modèles simulent des **nuages** dans l'atmosphère qui se comportent de manière différente. En effet, les paramétrisations physiques qui simulent les nuages reposent sur des hypothèses simplificatrices qui ne sont pas toutes les mêmes selon les modèles.

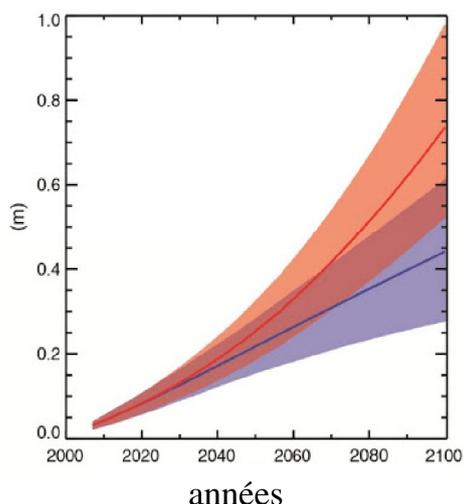
Les désaccords entre les modèles, ainsi que le fait qu'on ne comprend pas encore bien tous les mécanismes physiques par lesquels les nuages modulent le changement climatique, réduisent notre confiance dans certains résultats. Ce n'est pas un tabou : dans les publications scientifiques ou dans les rapports du GIEC, le degré de confiance et le degré de certitude sont systématiquement indiqués pour chaque résultat énoncé.

La présence d'un degré de certitude faible sur certains résultats n'a rien d'incompatible avec une confiance dans d'autres résultats, qui eux sont robustes.

(a) Évolution de la température moyenne à la surface du globe



(b) Évolution du niveau de la mer global



(c) Changement des précipitations en été

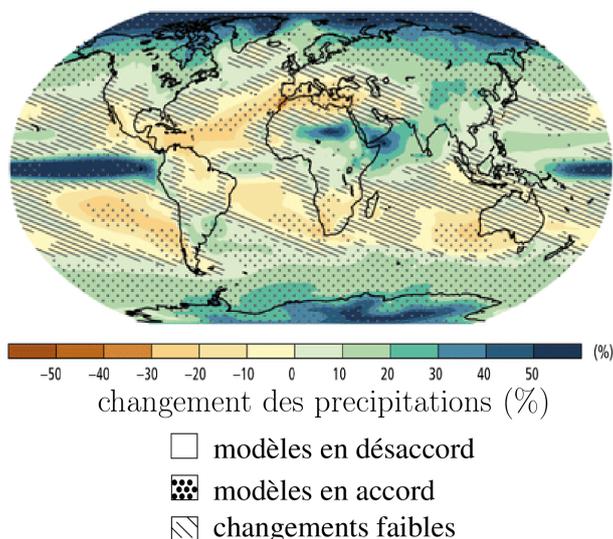


Figure 4 : résultats des projections climatiques réalisées dans le cadre de CMIP et publiés dans le 5<sup>e</sup> rapport du GIEC en 2013. (a) Évolution de la température moyenne à la surface du globe, en anomalie par rapport à la période actuelle, selon les différents scénarios de la figure 3. Les traits gras indiquent la moyenne de chaque modèle, tandis que les enveloppes indiquent la gamme de résultats des différents modèles. (b) La même démarche qu'en (a) est appliquée pour le niveau moyen de la mer. (c) Changement des précipitations en été dans le scénario le plus pessimiste (RCP8.5) sur la période 2081-2100, par rapport à la période actuelle. Les couleurs indiquent la valeur moyenne entre tous les modèles, tandis que les motifs indiquent le degré d'accord entre les modèles.

Retrouvez éducol sur



## Quelle confiance dans les modèles numériques et leurs projections ?

Si les modèles ne concordent pas, comment savoir lequel est le plus crédible ? On pourrait être tentés de choisir le « meilleur » modèle de climat de CMIP en utilisant par exemple une comparaison précise aux observations. Le problème est que chaque modèle a ses forces et ses faiblesses. Aucun modèle n'est le meilleur pour simuler toutes les variables météorologiques dans toutes les régions du monde. De plus, des erreurs peuvent se compenser pour donner de bons résultats par rapport aux observations actuelles, mais ne plus se compenser dans le climat futur. Ainsi, une bonne simulation du climat présent ne garantit pas nécessairement des projections plus crédibles.

On peut tester les modèles sur les **variations climatiques passées**. Ainsi, dans le cadre des programmes CMIP, chaque modèle réalisant des projections simule aussi le climat des périodes passées, telles que la dernière ère glaciaire. La capacité des modèles à simuler des changements climatiques passés informe-t-elle sur leur capacité à simuler les changements futurs ? C'est un sujet très actif de recherche.

D'autres scientifiques travaillent à mieux évaluer de manière ciblée certains mécanismes cruciaux dans les projections climatiques, comme les processus nuageux. On peut les étudier en détails dans des observations, ou dans des **modèles à très haute résolution**. Grâce à une résolution spatiale de l'ordre de 10 m à 100 m, ces modèles peuvent simuler explicitement les mouvements à l'intérieur des nuages (figure 5), alors que ces derniers sont représentés de manière statistique par les paramétrisations dans les modèles de climat. En contrepartie, du fait des limitations en puissance de calcul, ces modèles à très haute résolution tournent sur des régions et des durées limitées, par exemple un carré de 100 km de côté pendant quelques jours. C'est très insuffisant pour réaliser des projections climatiques, mais suffisant, pour étudier les mécanismes physiques et comparer aux résultats des modèles de climat.

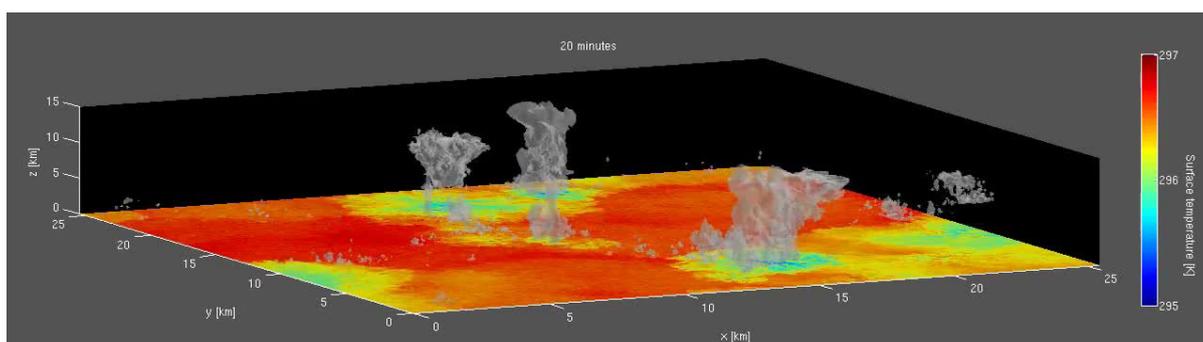


Figure 5 : Simulation à très haute résolution d'un champ de nuages d'orage sur l'océan, sur un domaine de 25 km de côté. Les zones grisées représentent l'eau nuageuse. Les couleurs représentent la température de l'air près de la surface.

Retrouvez éducol sur



## Pour aller plus loin

- [Logiciel SimClimat](#), logiciel pédagogique de simulation du climat
- Vidéo sur [La modélisation du climat](#) réalisée par CEA Sciences
- Logiciel C-roads disponible sur le [ClimateInteractive](#)

## Glossaire

### Anomalie

Différence par rapport à une référence. Par exemple, l'anomalie de température par rapport à la période 1979-2000 est la différence entre la température d'une année donnée et la température en moyenne sur la période 1979-2000.

### CMIP

Coupled model intercomparison project, ou « Projet d'intercomparaison de modèles couplés » en français. C'est un programme de recherche visant à comparer les différents modèles numériques de climat qui existent dans le monde. CMIP définit des protocoles de simulations que tous les modèles doivent réaliser. Les résultats de ces simulations servent à alimenter les rapports du GIEC. La phase actuelle, CMIP6, a démarré en 2014 et sert à alimenter le 6<sup>e</sup> rapport du GIEC en cours de rédaction.

### GIEC

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Il a été créé en 1988 en vue de fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade. Depuis lors, le GIEC a établi cinq rapports, dont le dernier a été publié en 2014, et a entamé la rédaction de son sixième rapport.

### Maille

Forme géométrique qui, juxtaposée de très nombreuses fois, permet de couvrir tout un domaine d'un modèle numérique. Par exemple, dans un modèle numérique de climat, l'atmosphère terrestre est découpée en de nombreuses mailles dans les trois dimensions : latitude, longitude et altitude. Ces mailles ont souvent une forme de pavés, mais peuvent aussi prendre la forme d'icosaèdres. L'ensemble des mailles forment le maillage.

### Modèle

Représentation d'un objet ou d'un phénomène par un concept, par un ensemble d'équations, ou par une expérience analogique.

### Modèle numérique de climat

Représentation du système climatique par un ensemble d'équations physiques qui sont résolues par un ordinateur.

## Modèle à très haute résolution

Modèle de l'atmosphère sur un domaine limité (maximum quelques centaines de kilomètres de côté) avec des mailles très fines, de quelques kilomètres voire quelques dizaines de mètres. Ces modèles permettent d'expliquer les mouvements dans les nuages.

## Paramétrisation physique

Composante du modèle numérique du climat visant à représenter par des équations physiques des phénomènes qui sont de taille inférieure à celle d'une maille. Ainsi, il existe des paramétrisations physiques pour les nuages de beau temps, les orages, l'évaporation du sol, la transpiration par la végétation ou encore le ruissellement de l'eau sur le sol.

## Projection climatique

Simulation du climat futur en supposant un scénario d'émissions ou de concentrations en gaz à effet de serre.

## Résolution

Taille de la maille d'un modèle. Plus les mailles sont petites, plus la résolution est « fine » ou « haute », et mieux les phénomènes sont détaillés.

## Robustesse

On dit qu'un résultat est robuste lorsque différents modèles numériques de climat et différents modèles de complexités différentes donnent le même résultat.

## Scénario

Ensemble d'hypothèses sur l'évolution des émissions ou des concentrations en gaz à effet de serre au cours des décennies ou siècles à venir. Les projections climatiques reposent sur ces scénarios. Il existe des scénarios plus ou moins optimistes (on réduit drastiquement les émissions mondiales) ou pessimistes.

## Simulation numérique

Expérience avec un modèle numérique.