



Changement climatique

impacts, atténuation et adaptation

Ce document est la transcription révisée, chapitrée et illustrée d'une vidéo du MOOC UVED « Changement climatique : impacts, atténuation et adaptation ». Ce n'est pas un cours écrit au sens propre du terme ; le choix des mots et l'articulation des idées sont propres aux interventions orales des auteurs.

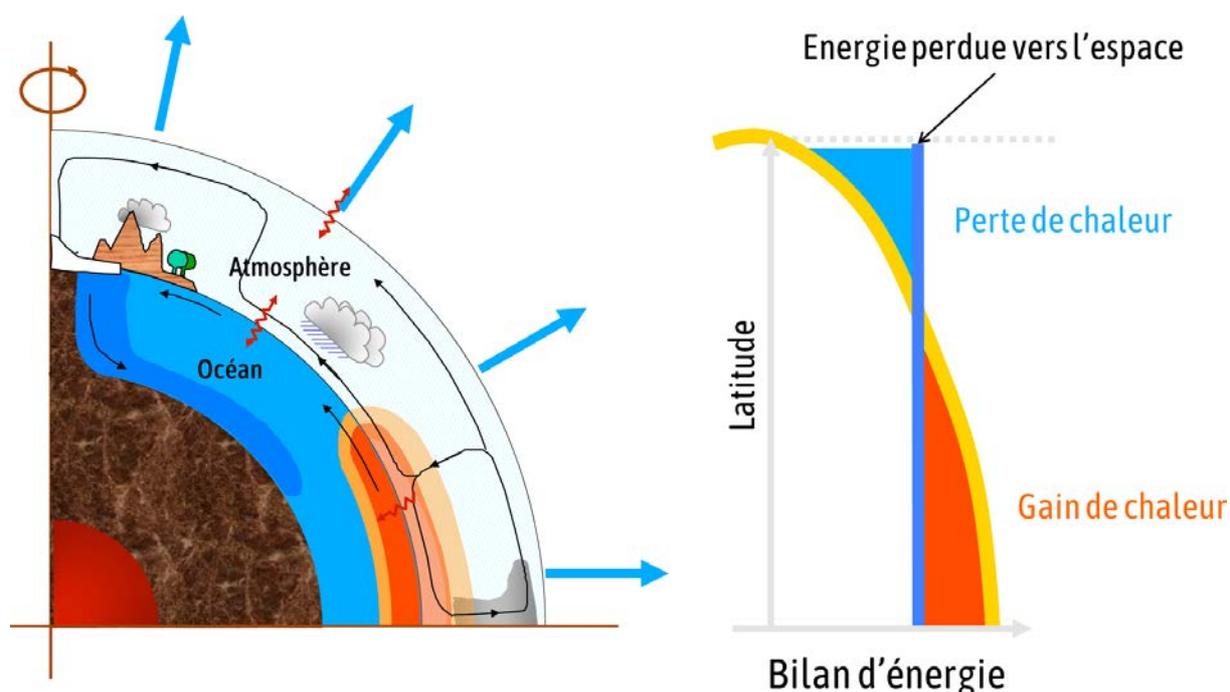
La modélisation du climat

Éric GUILYARDI

Directeur de recherche au CNRS



1. Le système climatique



Source : E. Guilyardi

La machine climatique reçoit son énergie du Soleil. Puisque la Terre est ronde, il y a plus d'énergie solaire qui arrive près de l'équateur par unité de surface qu'aux plus hautes latitudes. Si on fait un bilan de chaleur, en fonction de la latitude, on voit que dans les régions tropicales, on a un gain de chaleur, puisque l'énergie qui est perdue à l'espace est à peu près constante, ce qui est en bleu. Par contre, on a des pertes de chaleur vers les plus hautes latitudes. S'il ne se passait rien, il y aurait une accumulation de chaleur dans les tropiques et ça se refroidirait dans les plus hautes latitudes. Ce n'est pas le cas parce que la circulation de l'océan et de l'atmosphère, les courants océaniques et les vents atmosphériques, transportent cet excès de chaleur des tropiques vers les plus hautes latitudes. Donc, le climat est une énorme machine thermodynamique, un thermostat, à l'échelle de la planète, et c'est ça qu'il s'agit de modéliser.

Nous sommes aussi sur une planète extrêmement dynamique : il y a de nombreux cycles, le cycle de l'eau, le cycle du carbone, le cycle de l'énergie, et des flux entre les différentes composantes de ce système qu'il va falloir représenter.

2. Les ingrédients d'un modèle de climat

Il y a besoin d'un certain nombre d'ingrédients pour représenter un modèle de climat. D'abord, il faut des observations qu'on obtient depuis très longtemps maintenant à la surface de la Terre et de plus en plus ces dernières décennies. Cela va être des mesures de terrain avec un certain nombre d'instruments, mais aussi en allant dans des archives climatiques. Ensuite, les scientifiques, depuis encore plus longtemps, comprennent les lois de la physique, de la chimie, de la biologie, qui sont représentées par des équations. Vous avez ici les équations de Navier-Stokes qui représentent la loi d'écoulement d'un fluide, qui vont concerner l'océan et l'atmosphère dans un repère tournant qu'est le système terrestre. L'ensemble de ces observations, théories et modèles va être mis en œuvre sur des supercalculateurs.



3. La construction d'un modèle de climat

Pour construire un modèle, on va d'abord découper la Terre en boîtes tridimensionnelles qu'on appelle des mailles, à l'horizontale, quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres de large, et aussi en altitude, en troisième dimension. On va faire la même chose dans l'océan et sur les surfaces continentales. À l'intérieur de ces mailles, il faut représenter les phénomènes de plus petite échelle : par exemple, ça va être la représentation des nuages dans l'atmosphère qui jouent un rôle climatique extrêmement important. Il faut représenter l'effet moyen sur une taille de maille. Sur les continents, là aussi, une maille, c'est grand, donc il faut représenter le relief, la végétation, les cultures, le cycle de l'eau, les rivières qui vont jusqu'à l'océan, l'évaporation et le retour en altitude et les précipitations sur la terre. On va aussi représenter les activités humaines, les émissions de gaz à effet de serre, la déforestation ou d'autres impacts.

Dans l'océan, on va aussi découper en trois dimensions, jusqu'au fond de l'océan, à 4 000 m de profondeur, pour représenter les courants océaniques, avec ces équations de Navier-Stokes dont on a parlé. Il faut aussi représenter les phénomènes de sous-maille, comme les turbulences dans l'océan qui sont extrêmement importantes sur la circulation moyenne, et puis aussi le cycle du carbone, avec le plancton, le phytoplancton, qui participent à ce cycle du carbone.

Ensuite, ce modèle est découpé en boîtes. Chacune de ces boîtes va partir sur le supercalculateur où on va faire des calculs en parallèle sur des machines. Un supercalculateur, ça fait deux terrains de tennis remplis d'armoires dans lesquelles la simulation va tourner de quelques jours à quelques semaines, voire quelques mois, pour nos calculs les plus complexes. A partir de ces modèles, on va pouvoir regarder toutes ces variables, tous ces champs qui ont été simulés, pour pouvoir les utiliser comme outils d'expertise ou de projection.

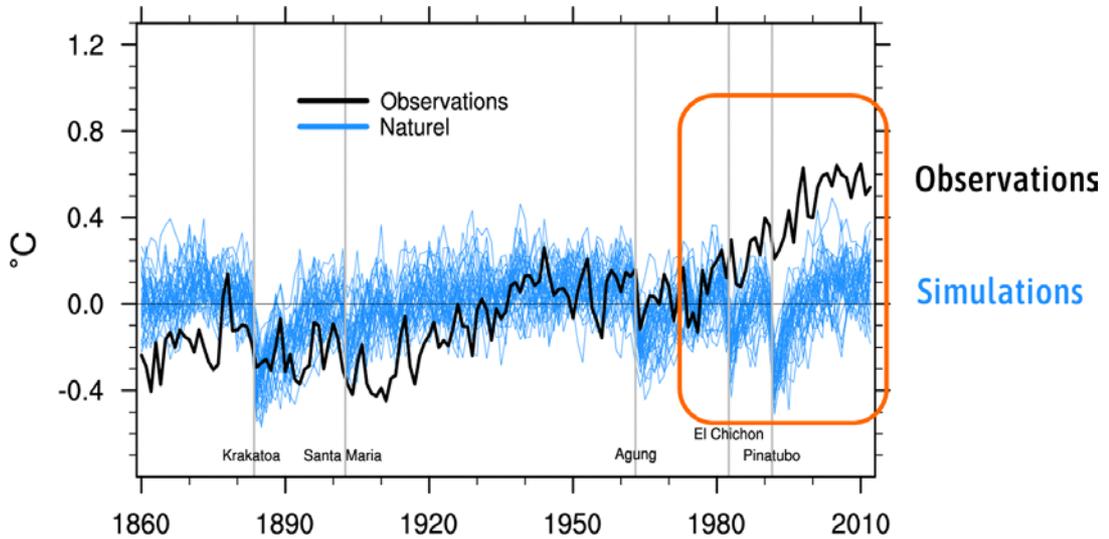
Aujourd'hui, l'océan global est bien représenté, de façon de plus en plus réaliste, par nos modèles, tout comme l'atmosphère. On n'arrive quasiment plus à distinguer une photo satellite qui représente la température de surface de la mer d'une simulation tellement le degré de réalisme est élevé. Ça nous permet de faire des prévisions de plus en plus précises.

4. L'usage des modèles de climat

Ces modèles sont absolument essentiels dans l'enquête qu'on a menée pour comprendre l'origine humaine du réchauffement climatique en cours. Vous avez ici à droite une tentative de simulation des derniers 150 ans, depuis le milieu du XIXe siècle jusqu'à aujourd'hui, en noir la courbe des observations de la température moyenne de la

Terre, ou son anomalie, et en bleu une trentaine de simulations. Une trentaine de groupes font ces simulations dans le monde, dont deux en France.

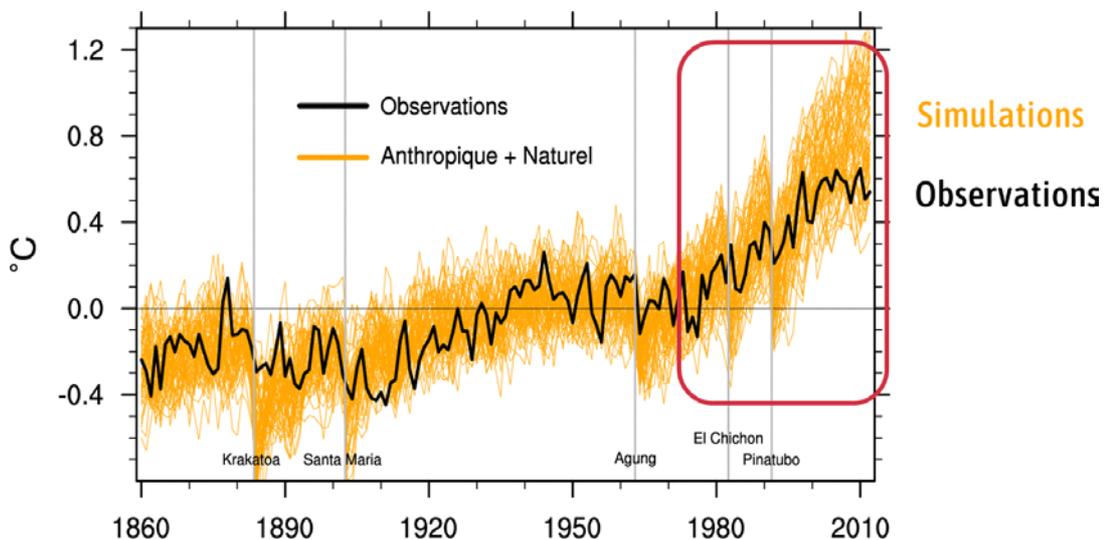
Simulation du climat avec les forçages naturels seuls



Source : GIEC, AR5

Vous voyez que jusque dans les années 1960-1970, on n'est pas trop loin des observations. Par contre on rate complètement l'augmentation quand on ne va utiliser que les forçages naturels, c'est-à-dire que les effets du Soleil ou le volcanisme. C'est uniquement quand on rajoute les effets liés à l'homme, les gaz à effet de serre, dioxyde de carbone, méthane, mais aussi les aérosols ou la déforestation qu'on va pouvoir reproduire cette augmentation depuis les dernières décennies. C'est même aussi plus précis sur les décennies qui ont précédé. Ça fait partie des éléments de preuve qui nous ont permis de dire à un moment : l'activité humaine est en train de réchauffer le climat.

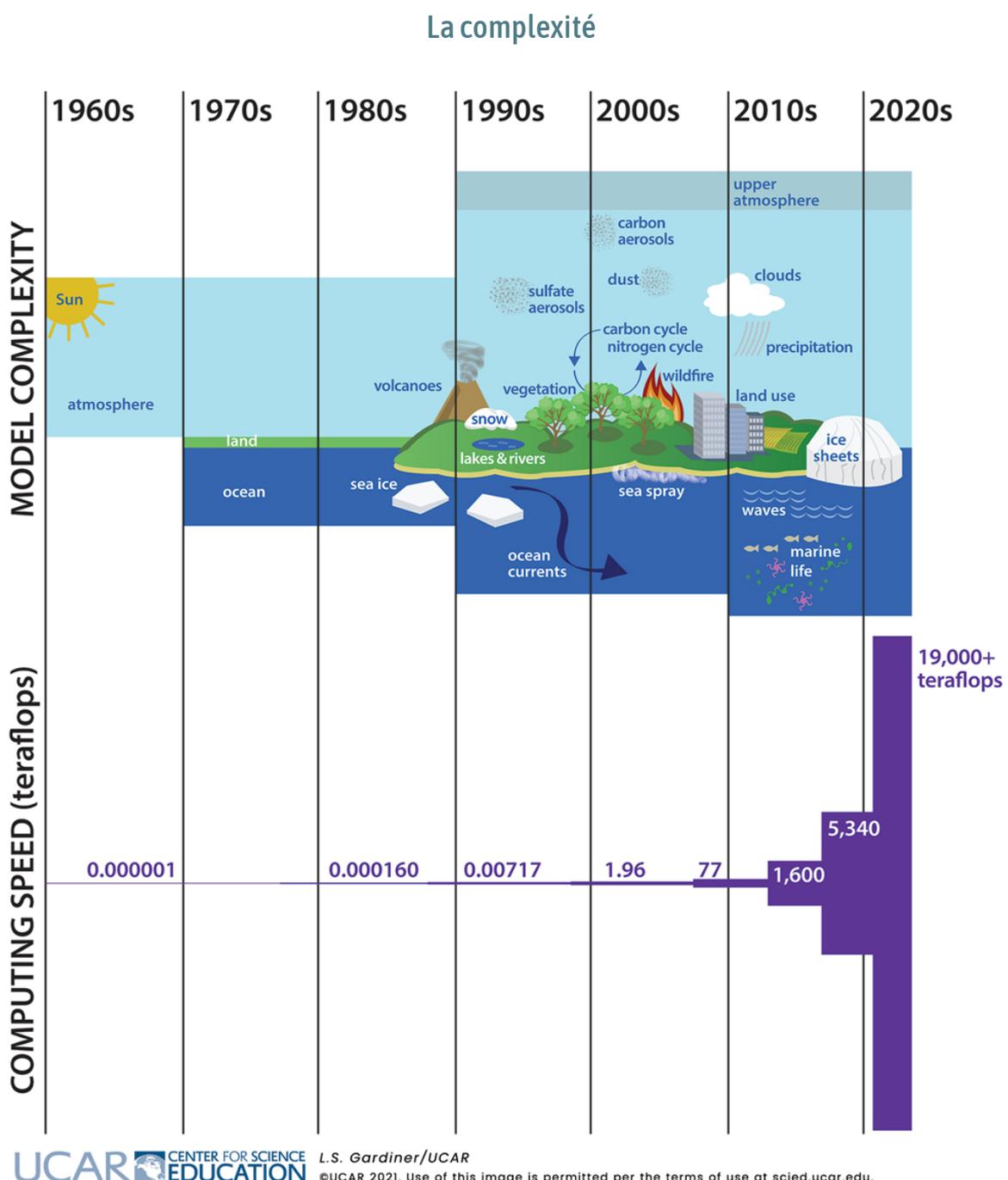
Simulation du climat avec les forçages naturels et humains



Source : GIEC, AR5

5. Quels enjeux pour les modèles de climat ?

Ces modèles de climat sont vraiment un outil essentiel pour nous. Ils sont d'une complexité croissante pour les rendre toujours de plus en plus fiables et précis. Cela se voit d'abord dans le nombre de composantes représentées. Dans les années 1960, on représentait l'atmosphère, puis on a rajouté l'océan, puis la cryosphère, la glace de mer ou les glaciers continentaux, puis les calottes de glace, puis la biogéochimie dans l'océan ou la chimie atmosphérique, pour arriver aujourd'hui à des modèles d'une complexité énorme. Il y a entre 500 000 et un million de lignes de code informatique qui représentent ces modèles donc c'est de très gros instruments pour nos communautés.



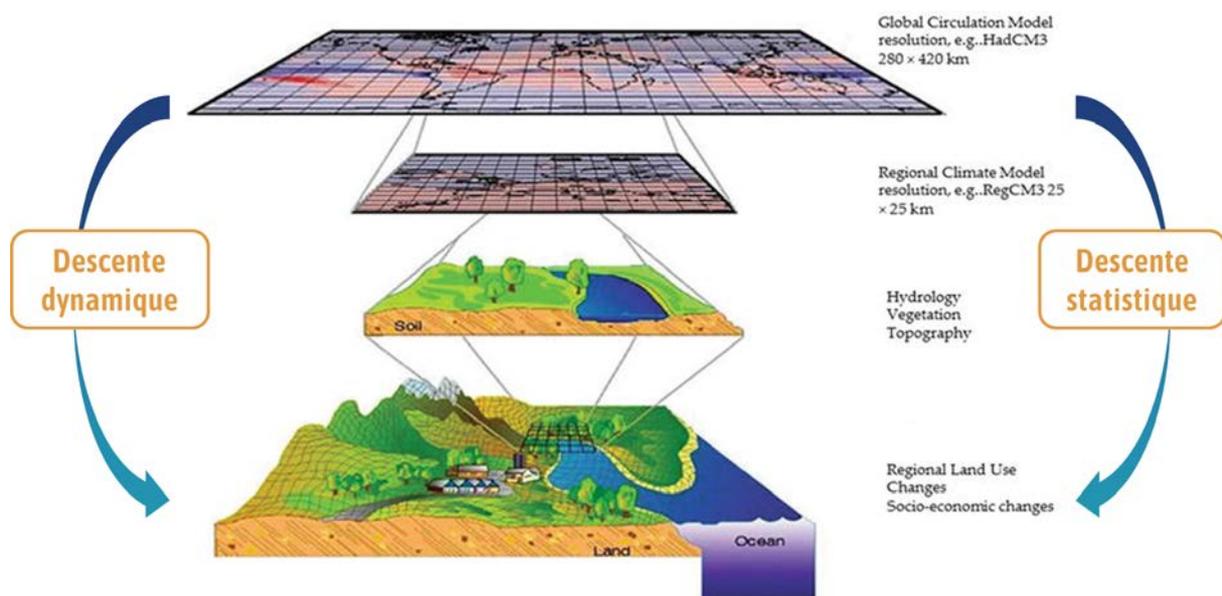
L'autre enjeu est la résolution spatiale : quand on passe d'une maille avec 200 km de résolution à une maille avec 100 km de résolution, le calcul va beaucoup plus coûter. Là aussi, on a besoin de supercalculateurs.

Un autre élément est la longueur de la simulation. Plus la simulation est longue, plus elle va coûter cher.

Un autre élément est l'ensemble de simulations. On a besoin de faire des dizaines, voire des centaines de simulations pour faire des statistiques sur ces simulations et pas juste une seule simulation. Suivant la question qu'on va se poser, on va favoriser l'une ou l'autre de ces sources de complexité. On voudrait les faire toutes en même temps, mais il faut faire des choix en fonction de la question scientifique posée.

Enfin, la décision se prenant au plus près du terrain, il y a besoin de faire une régionalisation, c'est-à-dire une descente en échelle, de passer de ces modèles globaux, à des mailles relativement grandes, à une information très locale, à l'échelle du kilomètre, voire en dessous. Pour ça, il y a deux moyens :

1. faire une descente en échelle dynamique, c'est-à-dire qu'on va réaliser un modèle à aire limitée qui aura une résolution plus importante,
2. faire une descente en échelle statistique, c'est-à-dire qu'on va trouver des liens statistiques entre la plus petite échelle et la grande échelle fournie par ces modèles globaux. Cette petite échelle est essentielle pour aider à la prise de décision de nos sociétés au niveau local.



Source : E. Guilyardi