

À propos du changement climatique : chiffres-clés et actions possibles

Rival Plougonven
Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) / École polytechnique

LE 17 JUIN 2024, RIWAL
PLOUGONVEN EST
INTERVENU DANS LE
SÉMINAIRE I3-CRG

Le but de la présentation est de parler du changement climatique, de transmettre des points de repères, quelques notions, et de restituer ce qui se fait à l'École polytechnique.

Changement climatique

Pour commencer, j'ai choisi deux figures du rapport du GIEC. J'essaierai de donner quelques notions clés, car ce sont souvent des figures extrêmement denses. Sur celle-ci (cf. figure), on voit un axe vertical avec la température du globe, une grandeur assez abstraite. Je vous propose donc de commencer par là. La température moyenne sur le globe est une variable clé pour quantifier le réchauffement climatique. Pour la calculer, il faut avoir suffisamment de données.

Quand on dit que l'on s'attend à un réchauffement climatique de plusieurs degrés d'ici la fin du siècle, cela peut sembler peu par rapport aux variations quotidiennes de température, comme entre une journée chaude d'été et une journée froide d'hiver où il peut y avoir une différence de plusieurs dizaines de degrés. Mais qu'est-ce que cela signifie vraiment, quelques degrés de différence à l'échelle mondiale ?

Au cours du dernier million d'années, la température suivait des cycles glaciaires. Lors de la dernière glaciation, la température moyenne a progressivement chuté de plusieurs degrés au fil de dizaines de millénaires, ce qui a eu des conséquences majeures : tout le Canada était recouvert d'une calotte glaciaire, de même que tout le nord de l'Europe, y compris le Royaume-Uni. On pouvait traverser la Manche à pied. Quelle était la différence de température moyenne entre cette période et aujourd'hui ? Je vous propose de comparer cela avec les changements projetés pour le siècle à venir, en suivant le scénario du « *business as usual* ».

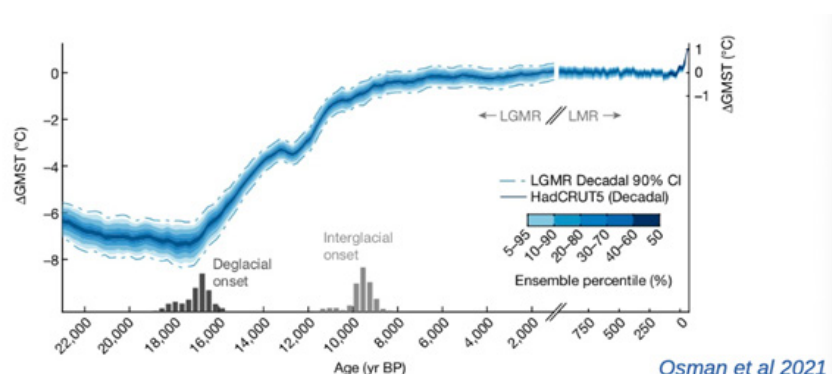


Figure 1.

C'est une courbe de reconstruction des températures (cf. figure 1). Ce que l'on peut voir, c'est qu'au dernier maximum glaciaire, il y avait une différence d'environ 6 degrés. 6 degrés pour la température moyenne de la surface de la Terre, c'est une fluctuation gigantesque, c'est un monde très différent. Là, nous sommes à un degré de réchauffement et nous visons à rester en dessous de 1 à 2 degrés. Les projections selon le scénario « *business as usual* » annoncent des changements de plusieurs degrés, comparables à ceux que je viens d'évoquer.

Un autre point important est que les cycles glaciaires durent environ 100 000 ans. La formation de la calotte glaciaire prend quelques dizaines de milliers d'années, tandis que la sortie de l'âge glaciaire se fait assez rapidement à l'échelle géologique, en environ 10 000 ans. En revanche, l'échelle de temps des changements actuels, en comparaison, est presque instantanée.

J'ai commencé à parler d'échelle de temps et de dynamiques. Quand on pense au climat, on pense à l'atmosphère. Cependant, il faut considérer le climat comme un système complexe impliquant de multiples composantes. Par exemple, l'océan a une inertie thermique bien plus grande, et les échelles de temps dans l'océan s'étendent sur plusieurs milliers d'années. Nous pouvons suivre ces échelles de temps par exemple grâce aux radionucléides envoyés dans l'atmosphère par les essais nucléaires des années 1950 et 1960. On sait exactement quand ces essais ont cessé, et en les détectant dans les zones profondes de l'Atlantique Nord, on obtient des informations sur les échelles de temps de la circulation de l'océan.

Il y a de nombreuses échelles de temps, comme celle de la cryosphère, qui concerne toute la glace sur la Terre et a une échelle de temps plus longue que celle de l'atmosphère.

Passons maintenant à un autre sujet lié au réchauffement climatique : la hausse du niveau de la mer.

Nous avons une figure issue d'un rapport du GIEC qui montre que, pour les différents scénarios socio-économiques, on est à moins d'un mètre, ce qui est déjà considérable. De plus, il ne faut pas considérer uniquement le niveau moyen global de la mer : la hausse du niveau de la mer aura une variabilité spatiale, et il faut aussi considérer les ondes de tempêtes... Je montre ce graphique pour :

1. Insister sur l'échelle de temps. Dans le scénario bleu clair, on réduit les émissions très rapidement, on atteint la neutralité carbone, mais les océans continuent d'augmenter.
2. Souligner que dans les projections, on se focalise sur la moyenne, mais on ne peut pas exclure, étant donné la dynamique des calottes glaciaires, qu'il est compliqué d'avoir des projections fiables. Il y a donc beaucoup d'incertitude. Dans le pire scénario, elles pourraient se déstabiliser et fondre rapidement, ce qui est d'ailleurs de plus en plus inclus dans les scénarios du GIEC. Donc, même si on arrête nos émissions, les conséquences vont continuer à se déployer. On n'exclut pas des scénarios avec plus d'impacts. La notion de points de bascule, pour lequel un système change de régime de fonctionnement lorsque l'on dépasse un certain seuil, est essentielle pour évaluer les risques, mais il y a beaucoup d'incertitudes sur d'éventuels points de bascule. Un exemple assez intuitif est celui des calottes glaciaires. Un autre exemple est la circulation océanique : un trop grand apport d'eau douce aux hautes latitudes de l'Atlantique Nord par exemple aurait des impacts sur la circulation des océans, sur les températures océaniques et du coup sur le climat européen.

Quelques mots maintenant sur l'IPCC. L'IPCC, pour Intergovernmental Panel on Climate Change, a été mis en place en 1988. L'IPCC ne fait pas de recherche, il passe en revue et synthétise les connaissances et les consensus en sciences du climat. C'est un organisme assez prudent, il présente des choses dont on est absolument sûr. Il y a tout un vocabulaire précis pour formaliser les affirmations et les résumer.

Pour illustrer ce point, imaginez qu'en tant que parent, quand un enfant monte sur un muret, on dirait « *descends tout de suite, tu vas te faire mal !* ». Si on traduit cela en langage IPCC, ça donnerait : « *Il est très peu probable que tu tombes. Néanmoins, si*



tu tombes, il est peu probable que tu te fasses mal ; par contre il est quasiment certain que cela t'embêtera de t'entendre pleurer... ». Quand les rapports de l'IPCC décrivent un changement, il faut garder en tête que le rapport est écrit par un organisme intergouvernemental qui décrit des consensus scientifiques. Il n'y aura pas d'injonctions.

Le premier rapport a été publié en 1990. Depuis, un rapport est produit tous les 5 à 7 ans. L'IPCC est divisé en trois groupes : un qui établit les bases physiques, un qui s'intéresse aux impacts et à l'adaptation, et un troisième qui s'intéresse aux stratégies d'atténuation. Les groupes 2 et 3 incluent beaucoup plus de sciences humaines. Les figures reprises dans ma présentation sont principalement issues du rapport du groupe 1 de 2021.

Les scénarios les plus optimistes nous permettent d'éviter de dépasser les 2 degrés d'augmentation pour la température moyenne. Pourquoi 2 degrés ? On peut dire que 2 degrés est un seuil raisonnable/atteignable minimisant les risques de systèmes pouvant atteindre des points de bascule.

Un autre aspect dont on parle peu est l'acidification des océans. C'est une conséquence de l'équilibre entre la concentration de dioxyde de carbone dans les océans et dans l'atmosphère. Plus le pH des océans diminue, plus il y a de conséquences dramatiques pour les écosystèmes et pour tous les animaux marins. Pour introduire la notion de rétroaction, regardons l'un des panneaux de cette figure : la glace. Les régions polaires sont plus sensibles, notamment à cause de ces rétroactions. Quand le climat est plus froid, il y a davantage de glace qui survit toute l'année. Plus de glace signifie davantage de rayonnement solaire réfléchi. Plus on fait fondre de glace, plus on rajoute de la chaleur dans l'océan, ce qui renforce le réchauffement climatique. Ces rétroactions sont essentielles pour estimer l'ampleur du dérèglement climatique.

On résume souvent le réchauffement climatique par cette température moyenne de surface, deux degrés de changement, mais ce n'est qu'un aspect. Il y a aussi l'acidification des océans, la montée lente du niveau de la mer, les points de bascule, les extrêmes...

Si on parle des extrêmes, prenons l'exemple des vagues de chaleur. Je vais me référer à une étude qui a examiné les conditions météorologiques propices aux vagues de chaleur dangereuses, ayant un impact important sur la mortalité. Cela définit des seuils pour la combinaison de température et d'humidité. Actuellement, 30 % de la population mondiale subit plus de 20 jours de fortes chaleurs par an. Des régions comme l'Indonésie et l'Inde en sont particulièrement affectées.

À la fin du siècle, dans le scénario *business as usual*, le pourcentage de la population mondiale affecté par plus de 20 jours de chaleur mortelle, sera de 74 %. Ce qui est le plus frappant dans cet article, ce sont les cartes montrant le nombre de jours par an de chaleur mortelle. Quand je parlais de 30 %, cela concernait une répartition en Inde. Si on regarde la même carte pour le scénario « *business as usual* », on voit que le rouge sombre représente des périodes de chaleur mortelle tout au long de l'année.

Une autre façon de voir les choses, et cela rejoint un point que j'aborderai à la fin, est une étude où ils ont mis beaucoup d'efforts pour évaluer la capacité des populations à s'adapter à la sécheresse et aux vagues de chaleur en utilisant des données démographiques. Ils ont ensuite intégré différents types de risques dans une même évaluation. Ce qui est représenté ce sont les proportions de population touchées par un seuil élevé de risques à différents niveaux de réchauffement. Ils considèrent des niveaux de réchauffement de 1 degré, de 3 degrés, etc.

Dans ces scénarios, ils examinent à quoi ressemble le monde avec un réchauffement de 1 degré, puis de 3 degrés, et ainsi de suite. L'ensemble du disque représente l'ensemble de la population mondiale, et la partie la plus sombre indique la proportion de la population affectée par plusieurs risques.

Le point clé à retenir est que chaque dixième de degré de réchauffement compte et se traduit par une proportion toujours plus importante de la population touchée par des risques élevés.

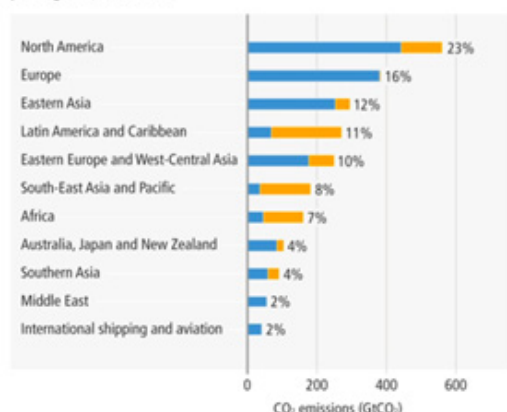
Émissions

Je m'arrête là sur l'aspect changement climatique. Je vais maintenant vous parler des émissions. Je ne vais pas vous faire un cours sur le transfert radiatif.

Toujours dans le but de vous donner quelques ordres de grandeur, à votre avis, avant la période préindustrielle (avant 1800) et aujourd'hui, de combien la concentration de dioxyde de carbone a-t-elle augmenté dans l'atmosphère ? 50 %. On avait un niveau 280 parties par million (ppm) avant la révolution industrielle et on a dépassé 420 en 2022...

40 gigatonnes de CO₂ par an. On peut se poser la question de la manière dont c'est réparti dans le temps et dans la population. Pour cela, je vais vous montrer deux figures. C'est basé sur le Global Carbon Project. On a le temps en abscisse et la partie verte correspond au changement d'usage des terres, par exemple quand on coupe des forêts. Quand on coupe une forêt, il y a des émissions correspondant au carbone qui était contenu dans les plantes et dans les sols. Ces émissions ont assez peu varié. L'autre courbe montre les émissions résultant de l'usage des combustibles fossiles, qui augmente progressivement à partir de la deuxième moitié du XIX^e siècle. Il y a une « grande accélération » après la Seconde Guerre mondiale.

Who emits ? Who has emitted ?

b. Historical cumulative net anthropogenic CO₂ emissions per region (1850–2019)

c. Net anthropogenic GHG emissions per capita and for total population, per region (2019)

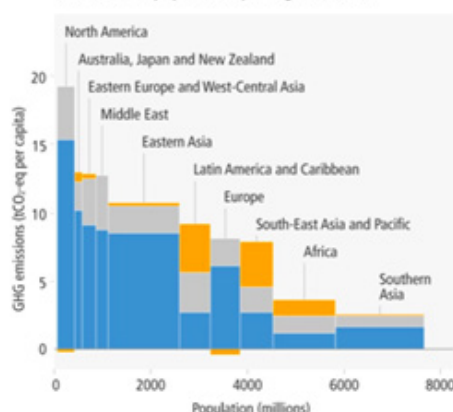


Figure 2.

Comment ces émissions sont-elles réparties en termes de population ? Nous avons deux graphes du GIEC. La figure de gauche montre les émissions cumulées dans le temps, sur l'ensemble de la période 1850-2019. Une chose importante à noter est que tout le CO₂ ne reste pas dans l'atmosphère. La moitié va dans l'océan, dans la végétation... on perturbe un cycle. Le CO₂ qui reste dans l'atmosphère y reste et ne se dégrade pas, ou que très lentement. Revenons au graphique des émissions cumulées : Un quart des émissions cumulées vient d'Amérique du Nord, et l'Europe représente 16 %.

Le graphe de droite montre la répartition actuelle par personne. L'axe horizontal représente la population en millions de personnes. Nous avons environ 7 milliards de personnes. Ce sont des valeurs moyennes, les niveaux vont de trois tonnes à presque 20 tonnes par personne, des inégalités fortes entre régions du monde. En France, c'est environ une dizaine de tonnes par personne. Et il faut garder à l'esprit qu'il y a, au sein de chaque région, de chaque pays, des disparités très fortes au sein des populations.

Si on revient à ce graphique qui était présent en page de titre, les projections montrent qu'il y a une relation essentiellement linéaire entre les émissions cumulées et le réchauffement. D'après la courbe, si on veut rester en dessous de deux degrés, il nous reste donc un certain budget carbone. Le point important est qu'au rythme actuel des émissions, ce budget sera épuisé en deux à trois décennies, pas plus.

On peut se poser maintenant la question des activités qui émettent. Là, je vais présenter une figure complexe issue du résumé du sixième rapport, mais il faut retenir un message simple. Ce qu'il faut avoir en tête, ce sont les grandes catégories, sans chercher à les quantifier précisément (ça va dépendre de choix méthodologiques (émissions « directes », émissions « indirectes ») : les principales contributions sont liées aux bâtiments, à l'agriculture/déforestation, aux transports, aux processus industriels, et à d'autres usages liés à l'énergie... il n'y aura donc pas une solution miracle, il faudra des changements dans tous ces secteurs d'activités.

À l'échelle de la France, dans les rapports du Haut Conseil pour le Climat, on retrouve l'idée que les transports, l'industrie, l'agriculture et les bâtiments apportent les quatre principales contributions de nos émissions.

Actions

J'en viens aux actions, au niveau global, au niveau individuel, au niveau institutionnel. Je vais être rapide sur le niveau global. Je reprends cette figure du GIEC, qui fait partie du rapport pour décideurs de 2022. Elle nous indique quels sont les leviers, quelles sont les actions que nous pouvons entreprendre pour baisser nos émissions d'ici 2030. Cet axe est en gigatonnes et les couleurs correspondent aux coûts. Sans entrer dans les détails, il y a des solutions, mais il faut enclencher toutes les solutions possibles pour arriver à des réductions en phase avec ce qu'il est nécessaire de faire d'ici 2030. Parmi ces solutions, je vais regarder seulement les deux premières lignes : *wind energy et solar energy*, dont vous avez sûrement entendu parler. Ce sont des éléments de solutions considérables, chacune permettant de réduire de 4 gigatonnes. Mais ce ne sont pas des solutions miracles ; il s'agit de toutes les émissions, en CO₂ équivalent. Le niveau actuel d'émissions est de 60 GtCO₂e (e pour équivalent) actuellement. Une réduction de 8 Gt serait considérable, mais cela reste une fraction de l'effort à faire.

Quelques mots sur ce que l'on peut faire au niveau personnel. Tout d'abord un disclaimer : j'en parle parce qu'il me semble que c'est fréquent, naturel et légitime de la part de l'auditoire de se poser des questions sur ce que l'on peut faire ; cependant je n'ai aucune leçon à donner, je ne donne aucune injonction. Je propose juste des clés pour aider à quantifier au niveau personnel, et comprendre sur quoi il peut être pertinent de faire des efforts pour changer des comportements. On peut regarder pour commencer les moyennes des émissions personnelles en France (cf. Rapport de l'ADEME). On a 10 tonnes de CO₂ par an par individu. Il y a le chauffage bien sûr et la consommation de viande. C'est une moyenne et il y a énormément de disparités. Les 15 % les plus riches émettent plus que les 50 % les moins riches. À l'échelle du globe, manger de la viande nécessite beaucoup de terres agricoles. En manger moins semble être un changement qui a du sens. Pour se guider quantitativement dans ses choix, il y a un article paru en 2017 où ils essaient d'évaluer les changements individuels qui ont le plus d'impact. Le message principal est de vivre sans voiture, éviter de prendre l'avion, et adopter un régime alimentaire avec peu de viande. Ce sont les trois leviers qu'ils estiment être les plus efficaces à titre individuel.

Localement, ou institutionnellement, je m'adresse à vous avec une casquette de responsable pédagogique du groupe de travail développement durable mis en place en 2019. Au sein de ce groupe, nous avons organisé des séminaires de sensibilisation pour les élèves (cycle polytechnicien, bachelor et MSCT). Au niveau du Centre de

Recherche, certains laboratoires réfléchissent à réduire leur empreinte. À l'École polytechnique, il y a ce groupe de travail et une déléguée au développement durable, Anne-Sarah Socié. L'école a pris des engagements dans le cadre d'un plan climat en 2022, sur trois volets : enseignement, recherche, campus.

Sur le plan de l'enseignement, je vais parler d'une initiative : la préparation d'un cours obligatoire pour le cycle polytechnicien. Ce cours commencera en août 2024 et est coordonné par Céline Guivarch, économiste du climat au CIRED, Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement. Elle a contribué au rapport du GIEC et fait partie du Haut Conseil pour le Climat. Elle a constitué une



équipe interdisciplinaire de huit personnes issues de sept départements. Le but du cours est de donner une vue large et de montrer aux élèves la nécessité de confronter les besoins en tenant compte de plusieurs disciplines. Pédagogiquement, ce cours soulève plusieurs défis. Pour leur fournir une solide matière à réflexion en suivant différentes approches, il faut des experts de plusieurs disciplines. Mais avec plusieurs intervenants, il faut beaucoup de travail pour éviter une juxtaposition, éviter un survol, et faire ressortir un fil conducteur cohérent. Il y aura notamment, au début et à la fin, des moments spéciaux. Au début, une déambulation sur le campus avec une piste audio les invitera à observer ce qui les entoure en lien avec les sujets. À la fin, ils auront à effectuer un travail par petits groupes, sur une question ciblée, et seront invités à se projeter dans l'avenir.

DÉBAT

Question : La question que je me pose, d'un point de vue social et sociétal, c'est à partir de quand notre civilisation court-elle un risque de défaillance ? Est-ce quelque chose qui est étudié ? À la fin des rapports du GIEC sur le climat, la question des conflits armés est souvent soulevée. Je suis assez surpris que cela ne soit pas mentionné dans ces rapports. Est-ce évoqué, et si oui, à quel moment y a-t-il un point de bascule ?

Réponse : Je vais vous montrer ma dernière diapositive. J'ai une photo de nuage qui correspond à ma recherche sur la dynamique des fluides dans l'atmosphère. Je ne suis pas du tout équipé pour parler des sujets liés aux sciences humaines. Dans les rapports du GIEC, le Groupe 1 traite des bases physiques. Dans les rapports des 2^{ème} et 3^{ème} groupes, selon ma compréhension, il y a des résultats liés à des consensus et à des questions extrêmement importantes mais qualitativement plus difficiles à cerner, comme celles que vous évoquez. Je suis d'accord avec vous en tant qu'individu : quand on regarde cette figure, c'est un peu une affirmation scientifique des solutions existantes, les coûts sont estimés mais il y a un sous-entendu. Il faut mettre en place un marché du carbone ; il faut un consensus international permettant un engagement sur le long terme.

Question : J'ai une question par curiosité sur les données : y a-t-il un débat sur la fiabilité des données sur le long terme ?

Réponse : C'est une bonne question. À partir des années 1970/1980, il y a des observations par satellites. En remontant dans le temps sur les dernières décennies, avec les stations météo, on peut faire des calculs indépendants. En remontant encore plus loin, il y avait des observations dès le XVI^e siècle avec des instruments météorologiques jusqu'au début du XIX^e, dans un environnement rural qui s'est urbanisé. Tout ce qui est historique nous permet de remonter plusieurs siècles. En remontant plus loin encore, comme avec les carottes de glace en Antarctique, la glace se forme par la neige, il subsiste des bulles d'air. En analysant la composition en isotopes de la glace, et la composition en gaz de ces bulles, on reconstitue des informations précieuses sur les climats passés (le lien entre isotopes d'oxygène et température vient de la sensibilité à la température pour le fractionnement lors du passage de l'état liquide à l'état de vapeur) ■

Notes prises par Laure Colin, revues par l'auteur de la présentation