

Queste de savoir

Comprendre le forçage radiatif

10 décembre 2023

Table des matières

Introduction	1
1. Qu'est-ce que le forçage radiatif?	1
1.1. La Terre est une casserole spatiale sur une plaque de cuisson solaire	2
1.2. Le forçage radiatif	2
1.3. Estimation du forçage radiatif global	3
2. Quels sont les contributeurs au forçage radiatif?	3
2.1. Variation de l'énergie reçue par le soleil	3
2.2. Variation de l'énergie retenue sur Terre	4
3. Les boucles de rétroaction climatiques	6
3.1. Qu'est-ce qu'une boucle de rétroaction climatique?	6
3.2. Exemple de boucles positives (ça chauffe dur)	6
3.3. Exemple de boucle négative	7
3.4. Bilan des différentes boucles de rétroaction	7
4. Peut-on contrôler le forçage radiatif?	8
4.1. La géo-ingénierie	8
4.2. Changer nos modes de consommation	9
Conclusion	9
Contenu masqué	9

Introduction

Le risque d'un réchauffement climatique lié à une augmentation du dioxyde de carbone [a été expliqué dès 1896](#) [☞](#) par le suédois Svante Arrhenius. Sa réalisation est déjà discutée auprès du grand public depuis bien longtemps également, comme en témoigne par exemple [cet article](#) [☞](#) du *New York Times* en 1956. Et si la question du réchauffement climatique aujourd'hui est devenue omniprésente dans une grande partie du monde, la technicité des discussions dépasse rarement la question des émissions de CO₂.

La notion de **forçage radiatif**, au centre même de la question du réchauffement et plus généralement du dérèglement climatique, est essentielle pour comprendre les mécanismes qui mènent à la situation dramatique actuelle. Nous verrons donc en profondeur ce qu'est le forçage radiatif, son fonctionnement et son rôle dans le réchauffement de la planète.

1. Qu'est-ce que le forçage radiatif ?

Pour comprendre le forçage radiatif, il est utile de comprendre comment un système échange de l'énergie avec le reste du monde.

1. Qu'est-ce que le forçage radiatif?

1.1. La Terre est une casserole spatiale sur une plaque de cuisson solaire

Imaginez une casserole sur une plaque de cuisson: si l'on chauffe plus que la chaleur ne s'échappe, la casserole se réchauffe et inversement, elle se refroidit si plus de chaleur est perdue qu'on en apporte.

Nous pouvons faire un parallèle entre la casserole et la surface de la Terre. Le système est la surface de la Terre: son atmosphère, les premiers quelques mètres ou kilomètres de sol, les océans, etc. En dehors de ce système, on retrouve le vide intersidéral et tout son contenu, en particulier le Soleil, qui en est l'élément avec la plus forte influence.

Nous avons alors, comme pour la casserole:

- un apport d'énergie, essentiellement dû au rayonnement solaire (la chaleur du cœur de la Terre est négligeable, comme le sont aussi les chutes de météorites ou n'importe quel autre phénomène qui apporte de l'énergie à la Terre);
- une perte d'énergie: le rayonnement réémis par la Terre vers l'espace, par exemple, celui réfléchi par la neige de l'Antarctique.

L'énergie ici est sous forme de rayonnement, mais elle finit toujours plus ou moins rapidement sous forme de chaleur (ce sont les lois physiques qui l'imposent). Donc si l'on apporte plus d'énergie qu'on en perd, la Terre dans son ensemble aura tendance à se réchauffer et si l'on apporte moins d'énergie qu'on en perd, la Terre aura tendance à se refroidir.

1.2. Le forçage radiatif

On a vu que l'énergie sur Terre était reçue ou perdue sous forme de rayonnement. Le forçage *radiatif*, c'est-à-dire relatif au *rayonnement* est la différence entre l'énergie reçue sur Terre et celle qui est renvoyée dans l'espace. C'est aussi simple que ça pour la définition!

En général, on exprime le forçage radiatif relatif à une surface et à une période de temps, de sorte qu'il s'exprime en watts (joules par seconde) par mètre carré. Autrement dit, il s'agit d'une puissance par unité de surface qui quantifie à quel rythme l'énergie de la Terre évolue avec le temps (en augmentant si forçage positif, en diminuant si forçage négatif).



Attention à ne pas faire de confusion avec la connotation habituelle du mot *positif*. Un forçage positif, en réalité une augmentation par rapport à la normale, peut contribuer au réchauffement climatique. De même, un forçage négatif, bien qu'il puisse sembler défavorable, peut en fait induire une tendance au refroidissement, ce qui n'est pas nécessairement une mauvaise chose.

Ce qui est compliqué avec le forçage radiatif, c'est l'identification et l'estimation de tous les paramètres, le climat terrestre étant un système fort complexe. Notamment, une partie des phénomènes sont amplifiés par l'augmentation de la température et d'autres atténués. Il faut aussi également bien identifier tous les nombreux phénomènes qui interviennent et leurs interactions afin de comprendre l'effet sur le climat.

2. Quels sont les contributeurs au forçage radiatif?

1.3. Estimation du forçage radiatif global

On peut mesurer le forçage radiatif global. Depuis quelques décennies, des satellites mesurent ce qui est reçu depuis le Soleil et réémis par la Terre. En faisant la différence entre ces deux valeurs, on constate que le forçage est globalement positif.

C'est une information intéressante, car il s'agit d'une estimation assez directe, mais elle ne donne aucune indication sur les différents contributeurs à ce bilan: quels sont les phénomènes individuels qui font renvoyer plus ou moins de rayonnement vers l'espace? Ou, dit autrement, qui sont les contributeurs au forçage radiatif?

2. Quels sont les contributeurs au forçage radiatif?

Identifier les contributeurs au forçage radiatif global est une tâche laborieuse, mais importante, car elle permet:

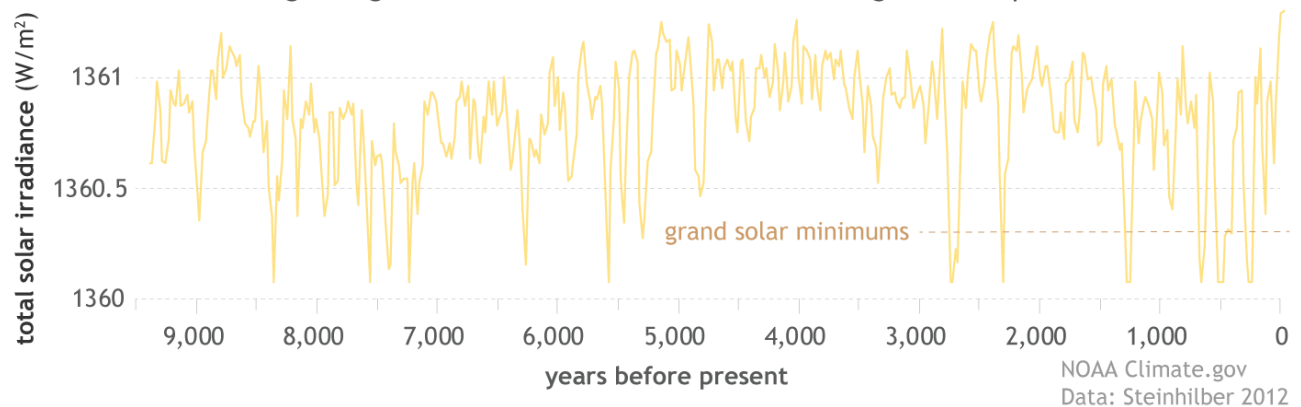
- de comprendre les phénomènes physiques impliqués, et comment l'équilibre se déplacera (modération du réchauffement ou emballement par exemple);
- de déterminer les facteurs sur lesquels il est possible d'agir pour limiter le changement climatique associé au forçage.

2.1. Variation de l'énergie reçue par le soleil

Le facteur positif le plus important est bien sûr l'énergie reçue depuis le Soleil.

Cette valeur est relativement stable au cours du temps, et tourne autour de 1361 watts par mètre carré¹. Il existe des variations cycliques, le plus visible à l'échelle humaine étant un cycle d'environ 11ans, qui peut faire varier l'énergie reçue jusqu'à 1 watt par mètre carré. Cela se traduit par une variation dépassant rarement les 0,1°C sur la température terrestre moyenne. Bien que certains cycles soient plus forts que d'autres, les cycles forts et faibles se compensent, et cette variation d'activité n'a finalement pas d'influence notable sur le climat à plus long terme.

Variations in incoming sunlight over the Holocene based on cosmogenic isotopes



1. Plus précisément, il s'agit de la puissance reçue par un disque du diamètre de la Terre. Si on répartit cette puissance sur la surface de la Terre, on trouve une valeur de 340 watts par mètre carré, que vous retrouverez peut-être dans d'autres lectures.

2. Quels sont les contributeurs au forçage radiatif?

FIGURE 2.1. – Variations de l'activité solaire sur 9400ans.³

☉ Bonus: comment peut-on avoir des données aussi vieilles sur la variation?

Sur des échelles de temps plus longues, la variation de l'orbite terrestre a une influence importante sur le climat, notamment visible à travers les cycles de glaciations. Cependant, la période qui nous intéresse est la période la plus récente et ces cycles-là n'ont pas d'influence notable sur un temps aussi court.

En bref, le Soleil n'y est pas pour grand-chose dans l'évolution du forçage radiatif ces derniers siècles et il faut se tourner vers ce qu'il se passe sur Terre.

2.2. Variation de l'énergie retenue sur Terre

Les climatologues étudient les différents mécanismes de forçage radiatif et les comparent à la situation estimée avant la période industrielle (1750 étant la date retenue comme limite, où le forçage radiatif est considéré comme nul). Cela permet de mettre en valeur les changements récents liés à l'influence humaine.

2.2.1. Catégories principales

On peut classer les différents phénomènes en trois catégories principales:

- les gaz à effet de serre,
- les changements dans la capacité à réfléchir la lumière de la terre (l'albédo),
- les aérosols.

Les gaz à effet de serre absorbent le rayonnement solaire et le réémettent sous forme de chaleur dans l'atmosphère. Ils ont ainsi une contribution positive au forçage radiatif. Le plus important d'entre eux est le dioxyde de carbone (CO_2), suivi du méthane (CH_4), mais d'autres gaz complètent l'inventaire, tels que certains halogènes ou le protoxyde d'azote (N_2O). Une part de ces gaz est issue de l'activité humaine (par exemple le dioxyde de carbone issu de la combustion du pétrole) et d'autres sont d'origine naturelle (par exemple le méthane émis par certaines zones humides).

Les changements d'albédo sont dus principalement à des changements d'usage des terres ou à des poussières. Les changements d'usage des terres peuvent être du fait de l'homme (par exemple la construction d'une route sombre à la place de champs de blé), ou naturels (par exemple la croissance d'une forêt aux dépens de terres autrefois cultivées). Le changement d'usage des terres a globalement une contribution négative au forçage radiatif parce que les forêts reculent en moyenne au profit des terres cultivées, qui réfléchissent plus la lumière. Attention, la déforestation a certes un effet négatif par rapport à l'albédo, mais ce dernier est largement contrebalancé par l'effet positif de destruction de puits de carbone. La poussière (d'origine humaine par exemple) à la surface de la neige ou de la glace, absorbe le rayonnement (effet positif sur le forçage radiatif), ce qui tend à réchauffer la glace et à la faire fondre.

2. Quels sont les contributeurs au forçage radiatif?

Les aérosols, autrement dit de fines poussières dans l'atmosphère, sont très variés. Certains augmentent le forçage radiatif (par exemple la suie) alors que d'autres réfléchissent plus la lumière et ont une influence négative sur le forçage radiatif (par exemple le dioxyde de soufre). Globalement le bilan est négatif: les aérosols réfléchissent plus la lumière qu'ils ne l'absorbent.

Quoi qu'il en soit, les estimations disent que les variations dues à l'homme sont de l'ordre de 2,7 watts par mètre carré et les variations naturelles négligeables. Cela peut paraître peu, mais ce qui fait l'effet, c'est l'accumulation. D'ailleurs, ce n'est pas si peu: si l'on consommait une telle puissance électrique sans discontinuer dans un logement de quelques dizaines de mètres carrés, cela nous coûterait plusieurs centaines d'euros d'électricité par an!

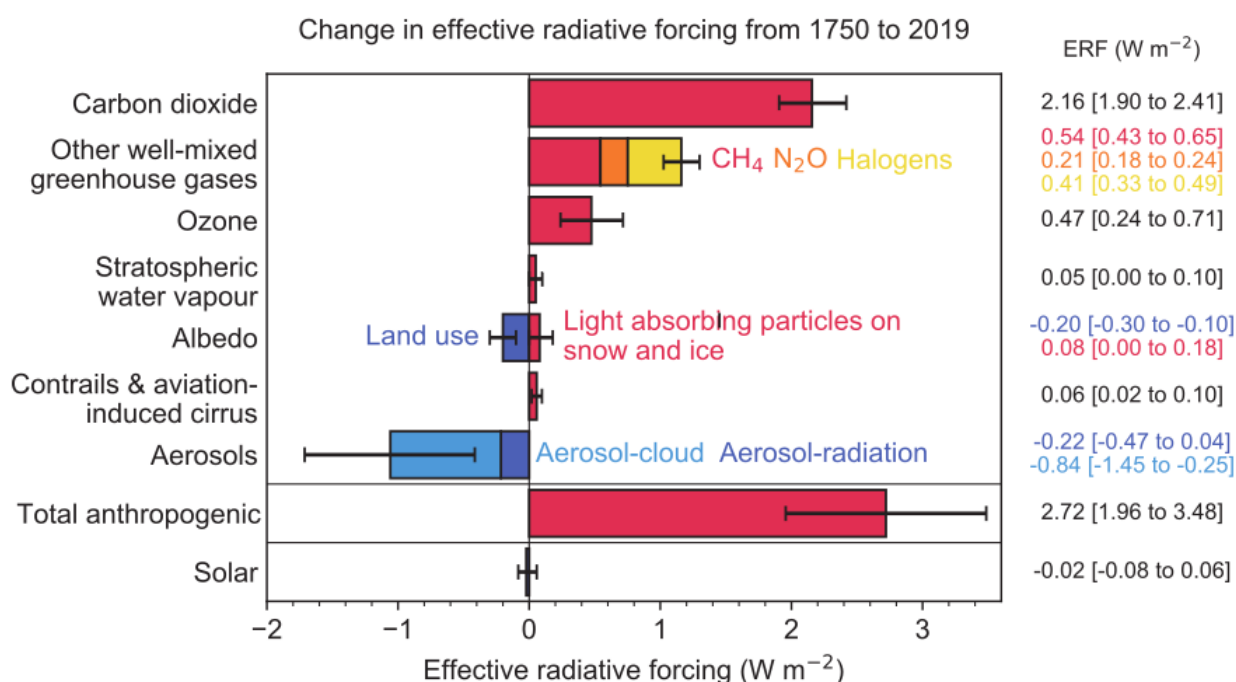


FIGURE 2.2. – Évolution du forçage radiatif selon ses contributeurs, comparaison entre 1750 (ère préindustrielle) et 2019 (date limite de modélisation pour l'étude en question).²

2.2.2. Un mot sur l'estimation

L'estimation est probablement la partie compliquée du métier. Tout le travail des climatologues et scientifiques en général est crucial.

Par exemple, les émissions de CO₂ mondiales sont généralement estimées en recueillant et en analysant les données provenant de diverses sources telles que les rapports des industries, les relevés des émissions des véhicules, les données énergétiques nationales et les modèles scientifiques pour quantifier la production de CO₂ à l'échelle mondiale.

2. 6^e rapport du GIEC, Working Group 1, page 959.

3. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-incoming-sunlight> ↗

3. Les boucles de rétroaction climatiques

Le forçage radiatif ne pilote pas directement le climat, il en est seulement un paramètre important qui gouverne son évolution. L'évolution du climat résulte notamment de boucles de rétroaction.

3.1. Qu'est-ce qu'une boucle de rétroaction climatique ?

Une boucle de rétroaction désigne un mécanisme interne au système climatique par lequel un paramètre, par exemple le forçage radiatif, affecte le système d'une manière qui affecte en retour ce même paramètre.

Plus concrètement, on peut imaginer que la température, en augmentant, amplifie un phénomène favorisant un forçage radiatif positif, qui aura ainsi tendance à augmenter encore plus la température, et donc le phénomène, dans une boucle de rétroaction dite *positive*, c'est-à-dire une amplification.

Pour une augmentation de température, on peut aussi imaginer d'autres phénomènes engendrant un forçage radiatif positif qui auront tendance à s'atténuer eux-mêmes, et donc la boucle de rétroaction à une action modératrice, on parle de rétroaction *négative*.

Ces boucles, positives et négatives, en concurrence, forment le moteur de l'évolution générale des températures moyennes sur Terre. Cela explique l'utilisation fréquente des termes tels que l'emballement ou les points de non-retour. Prenons quelques exemples.

3.2. Exemple de boucles positives (ça chauffe dur)

La vapeur d'eau. La vapeur d'eau est un des plus importants gaz à effet de serre. Si la température augmente, alors davantage d'eau s'évaporerait de la surface. Davantage de vapeur d'eau, davantage de gaz à effet de serre, davantage de hausses des températures.

La fonte de la neige. Le noir absorbe, le blanc réfléchit, c'est la question de l'albédo évoquée dans la section précédente. Moins de neige, moins de rayons réfléchis par rapport au sol nu, hausse du forçage radiatif, fonte de neige supplémentaire.

Absorption du CO₂ par l'océan. L'océan absorbe et stocke des quantités incroyables de CO₂, et atténue une grande partie des effets qui pourraient se produire à cause de nos émissions. Mais avec un climat qui se réchauffe, une eau plus chaude dissoudra moins bien le CO₂¹, et l'élévation des températures affaiblira les courants marins nécessaires au transport du CO₂ absorbé vers les couches les plus profondes des océans.

La fonte du permafrost. Elle libère dans l'atmosphère une quantité difficile à évaluer de méthane, qui comme vu précédemment est un gaz à effet de serre important et qui favorise le réchauffement.

1. <https://climate.mit.edu/ask-mit/how-will-future-warming-and-co2-emissions-affect-oxygen-concentrations> ↗

3. Les boucles de rétroaction climatiques

3.3. Exemple de boucle négative

L'augmentation du rayonnement thermique: la boucle de rétroaction la plus importante est négative. C'est la rétroaction de Planck, découlant de la loi de Stefan-Boltzmann. Elle affirme qu'une augmentation de la température augmentera le rayonnement thermique vers l'espace. C'est le même mécanisme physique qui fait briller notre Soleil si fort: il est très chaud. La Terre, de manière analogue, aura tendance à briller plus en se réchauffant et donc perdre plus d'énergie.

3.4. Bilan des différentes boucles de rétroaction

Voyons en ordre de grandeur ce que cela donne.

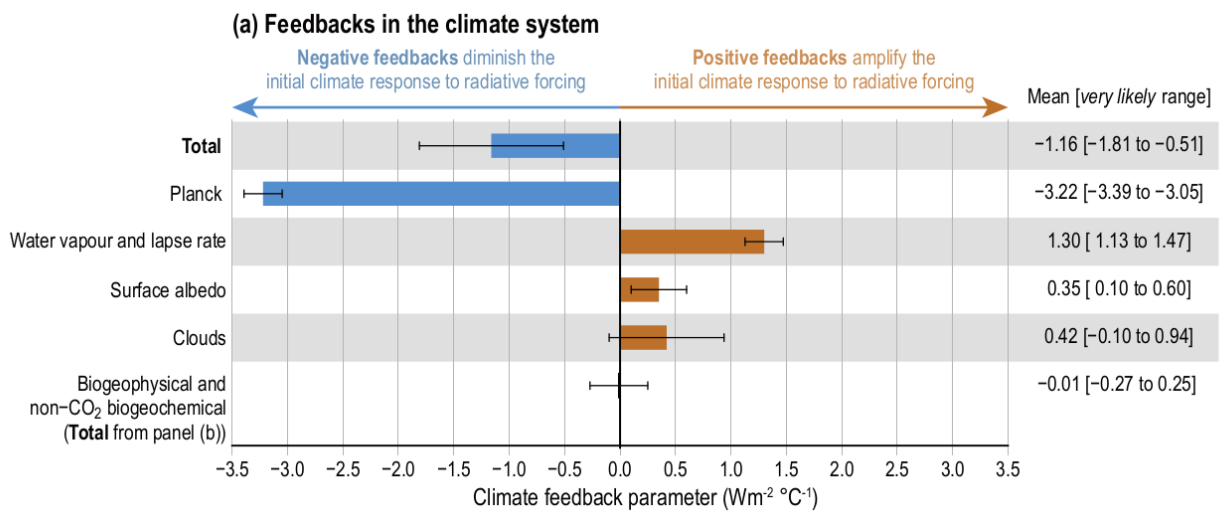


FIGURE 3.3. – Source²

On remarque que le résultat net est négatif. Cela signifie qu'une augmentation de la température est atténuée en partie par l'augmentation du rayonnement thermique, même si cet effet est lui-même atténué par les facteurs évoqués ci-dessus. C'est un résultat très important: si ça n'était pas le cas, on se trouverait dans un emballement auto-alimenté des températures où nous ne pourrions plus rien faire.

Attention cependant, cela ne veut pas dire que le point d'équilibre est agréable pour les humains!

Le calcul des boucles de rétroaction est important dans la modélisation, il permet d'avoir ensuite une mesure de la sensibilité du climat aux changements dans le forçage radiatif, ce qui permet alors d'estimer les changements à venir de température à la surface liés à un forçage radiatif positif.

2. 6^e rapport du GIEC, Working Group 1, page 96.

4. Peut-on contrôler le forçage radiatif?

Maintenant que vous avez une idée plus précise de ce qu'est le forçage radiatif et de son lien avec le dérèglement climatique, faisons un tour sur les options envisagées et mises en place pour nous sortir de cette situation.

4.1. La géo-ingénierie

La géo-ingénierie, ensemble des techniques qui visent à manipuler et modifier le climat, a fait l'objet de nombreux projets visant à atténuer le forçage radiatif et leurs implications. Voyons quelques exemples.

Captage et stockage du dioxyde de carbone (ou CSC): un processus visant à réduire les émissions de CO₂, un gaz à effet de serre, en les capturant directement à partir des sources d'émissions telles que les centrales électriques, les usines ou même à partir de l'atmosphère. Une fois capturé, le CO₂ est ensuite transporté vers des sites de stockage sécurisés, comme des réservoirs géologiques profonds ou des formations souterraines, où il est stocké de manière permanente pour éviter qu'il ne retourne dans l'atmosphère. Cette solution, déjà utilisée, est néanmoins extrêmement coûteuse. Elle reste pour autant une avance intéressante pour les domaines où la réduction des émissions est très difficile, comme le ciment ou l'acier, et le GIEC l'intègre dans ses modèles de mitigation du réchauffement climatique¹.

Injection d'aérosols dans la stratosphère: une des solutions les plus discutées, en cours de test par ailleurs, semble à première vue pratique. En effet, cela permettrait de réfléchir une plus grande partie du rayonnement solaire, et donc réduire le forçage radiatif. En dehors de la faisabilité d'en injecter une quantité intéressante, cette technique interroge beaucoup sur ses effets. On craint par exemple² que cela ne nuise à l'ozone stratosphérique, pourtant très important pour protéger la Terre de rayonnements dangereux. Ces techniques reviennent à simuler un volcan, mais comme pour ces derniers, les particules retombent, et donc un arrêt d'injections régulières pourrait avoir un effet brutal si l'on venait à en dépendre.

Bouclier solaire: peut-être plus futuriste et idéaliste qu'autre chose, l'astronome américain Roger Angel proposait en 2006 la création d'un gigantesque bouclier solaire que l'on enverrait dans l'espace pour réduire la quantité de rayons atteignant la terre. La difficile faisabilité du projet n'ayant pas entraîné de recherches, des études de leurs effets de bords potentiels pourraient sérieusement compromettre le sérieux de l'idée. En 2022, un laboratoire du MIT a cependant repris l'idée, et testé une version miniature d'une «bulle» qui aurait cet effet³.

La Grande muraille verte⁴: présentée dès le début des années 2000, cette initiative de l'Union africaine vise à créer une bande de forêts et écosystèmes s'étendant sur 15 kilomètres de large et 8 000 kilomètres de long entre le Sénégal et Djibouti. Luttant contre la désertification, c'est aussi la création d'un énorme puits de carbone, dont l'initiative a un peu évolué pour devenir un ensemble d'intervention pour ces mêmes objectifs. Passant par onze pays, c'est un projet

1. 6^e rapport du GIEC, Working Group III, page 38

2. Keith et al., 2016 [↗](#), Rasch et al, 2008 [↗](#)

3. <https://senseable.mit.edu/space-bubbles/> [↗](#)

Conclusion

compliqué et titanesque qui en est à moins de 20% de complétion plus de quinze ans après son lancement^{4 5}.

4.2. Changer nos modes de consommation

La réduction des émissions de gaz à effet de serre, qui comme nous l'avons vu sont les forces «positives» principales du forçage radiatif, est cruciale pour limiter ce dernier.

Selon le GIEC⁶, cela passera forcément par une remise en question profonde de nos modes de consommation, avec des changements radicaux dans tous les secteurs et notamment dans notre agriculture et notre gestion des forêts¹.

Conclusion

Récapitulons:

- le forçage radiatif, c'est la différence entre l'énergie reçue et l'énergie émise de la Terre ;
- s'il est positif, le climat a tendance à se réchauffer ;
- de nombreux facteurs influent dessus, dont les émissions de gaz à effet de serre ;
- malgré les progrès technologiques et leur importance dans notre lutte contre le dérèglement climatique, un changement de nos modes de consommation est impératif pour limiter le réchauffement climatique.

Comprendre les contributeurs au forçage radiatif, c'est faire le premier pas pour comprendre quelles solutions au réchauffement climatique existent et quel en sera leur impact. En analysant ces facteurs, on se rend compte de la prévalence des facteurs anthropiques et de notre responsabilité collective.

À nous de jouer!

Contenu masqué

Contenu masqué n°1 :

Bonus : comment peut-on avoir des données aussi vieilles sur la variation ?

Depuis les années 1970, des satellites nous permettent de mesurer l'activité solaire avec grande précision. De plus, ces mesures ont permis de modéliser la relation forte entre les taches solaires et l'irradiation solaire.

Combinée avec les relevés de ces dernières, effectués depuis le 17^e siècle, cette modélisation permet d'avoir une estimation de l'activité depuis cette époque.

4. [AFD](#)

5. [The Great Green Wall : Implementation status & way ahead to 2030](#)

6. 6^e rapport du GIEC, Working Group III, Foreword

Contenu masqué

Pour les données plus lointaines, comme sur l'intégralité de l'Holocène (12000 dernières années), les chercheurs ont utilisé des propriétés du champ magnétique du Soleil. Lorsque celui-ci est fort, à cause d'une forte activité solaire, il nous protège davantage des rayons cosmiques, qui génèrent en arrivant dans l'atmosphère terrestre des atomes radioactifs spécifiques. On a pu ainsi reconstruire les données d'activité solaire en analysant les variations de ces isotopes tels que le carbone-14 dans les cernes d'arbres et le béryllium-10 dans les carottes de glace.³ [Retourner au texte.](#)