



## « Les changements climatiques »

**Lundi 13 mars, vendredi 17 mars et mercredi 5 avril 2023**  
**Université de Liège**

**Trois matinées avec les étudiants des masters en géographie, orientation *Global Change*, en sciences spatiales et en biologie des organismes et écologie de l'Université de Liège**

Dans le cadre du cours « *Les changements climatiques et leurs impacts* », nous organisons les lundi 13 mars, vendredi 17 mars et mercredi 5 avril 2023, notre quinzième colloque annuel sur le thème des changements climatiques. Dans une série de mini-conférences, des étudiants des masters en géographie, orientation *Global Change*, en sciences spatiales et en biologie des organismes et écologie de l'Université de Liège tenteront de mieux faire comprendre les changements climatiques qui affectent aujourd'hui notre planète et analyseront les impacts possibles sur l'environnement et la société. Leurs exposés aborderont, entre autres, les questions suivantes : Quels impacts l'élévation du niveau de la mer aura-t-il sur les milieux côtiers et leurs populations ? Vaudrait-il mieux cibler d'abord le méthane plutôt que le CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère ? Migrations et changements climatiques : quels liens ? Quel est l'impact du numérique sur le réchauffement climatique ?

Cette année, trois demi-journées sont organisées. Elles s'adressent principalement aux élèves des classes de 5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> année du secondaire, mais sont également ouvertes aux étudiants du supérieur, aux enseignants, aux chercheurs et au grand public. Les inscriptions aux matinées sont gratuites, mais obligatoires.

**Informations: Guy MUNHOVEN, Institut d'Astrophysique et de Géophysique, Université de Liège, Quartier Agora, 19c Allée du Six Août, 4000 Liège. Tél.: 04/3669771, e-mail: [Guy.Munhoven@uliege.be](mailto:Guy.Munhoven@uliege.be)**

**Troisième matinée « Les changements climatiques »**  
**Mercredi 5 avril 2023, 9h30 à 12h00**  
**Université de Liège**  
**Auditoire Durkheim, Étage 0, Bâtiment B31 (Faculté de Droit)**  
**Sart Tilman – 4000 Liège**

09h30 – 09h50 **Accueil et introduction de la journée** (Louis François & Guy Munhoven)

09h50 – 10h10 **Les cycles de Milankovitch : Le lien entre l'astronomie et le climat**  
(Guillaume Timmermans)

*On entend souvent des climato-sceptiques dire que le climat de la Terre a toujours varié, ce qui est vrai. Une des causes de ces variations trouve son origine dans l'astronomie. Quel est le lien entre le mouvement orbital de la Terre, l'extension des calottes polaires et le climat global ? Peut-on s'en servir pour expliquer les changements climatiques actuels ?*

10h10 – 10h30 **Vénus : sœur jumelle de la Terre ?** (Élise Hemmen)

*D'apparence, Vénus et la Terre se ressemblent en de nombreux points, tels que leurs masses ou leurs tailles. Cependant, si l'on y regarde de plus près, avec sa température moyenne de plus de 460°C à sa surface, Vénus est en réalité radicalement opposée à notre planète. Comment est-ce que ces deux corps célestes en sont arrivés là ?*

10h30 – 11h05 **Pause**

11h05 – 11h25 **Le méthane : l'ami du CO<sub>2</sub> dont on ne parle pas assez ?** (Denis Cariat)

*Le dioxyde de carbone est le principal gaz à effet de serre, mais il n'est responsable que de 66 % du réchauffement climatique actuel. Qu'en est-il de son ami, le méthane ? D'où provient-il ? Est-ce qu'il est plus réchauffant que le dioxyde de carbone ? Comment agir sur son abondance dans l'atmosphère ? Est-ce que sa suppression rapide peut nous faire gagner du temps précieux dans notre lutte contre le réchauffement climatique ?*

11h25 – 11h45 **Connais-tu ton empreinte carbone ?** (Elsa Blond Hanten)

*Dès lors qu'on évoque le réchauffement climatique, on pense directement aux gaz à effet de serre. Parmi ces gaz, c'est le CO<sub>2</sub> qui a la plus mauvaise presse. En quoi l'activité humaine est-elle responsable de l'émission accrue de CO<sub>2</sub> ? Comment est-ce que toi, tu peux concrètement réduire ton empreinte carbone ?*

11h45 – 12h00 **Conclusions de la journée**

# Les cycles de Milankovitch :

## Le lien entre l'astronomie et le climat

---

Guillaume Timmermans

Master en sciences spatiales

### Introduction

Le climat sur Terre a toujours varié. Eruptions volcaniques, fluctuations de l'activité du Soleil, variations de la composition chimique de l'atmosphère,... énormément de paramètres, humains ou naturels, peuvent influencer le climat. De nos jours, le climat change à cause des humains (émissions de gaz à effet de serre, déforestation, etc.). Ici, nous allons discuter d'un processus – naturel – influençant le climat : les variations de paramètres orbitaux de la Terre. C'est la *théorie astronomique des paléoclimats*. Elle fut mise en évidence par le serbe Milutin Milankovitch vers 1940.

Avant de poursuivre, il est nécessaire de préciser que la théorie de Milankovitch explique les fluctuations climatiques dans le passé de la Terre à l'échelle du millénaire. En revanche, contrairement à ce que certains climatosceptiques prétendent, la théorie de Milankovitch n'explique absolument pas le changement climatique actuel, qui est la conséquence des émissions de gaz à effet de serre liées aux activités humaines.

### Principe général de la théorie de Milankovitch

#### L'énergie solaire disponible sur Terre et l'albédo

Le Soleil, via des réactions nucléaires, émet énormément d'énergie, dont une petite partie atteint la Terre et la « chauffe ». Si l'on ne considère pas des périodes de temps trop longues, nous pouvons supposer que l'énergie produite par le Soleil est constante. Même si nous allons aborder le sujet du passé de la Terre, l'approximation reste entièrement valide pour notre étude.

La température sur Terre et le climat en général sont principalement influencés par deux facteurs :

- 1) la portion de l'énergie solaire que la Terre reçoit : plus celle-ci est grande, plus il fait chaud (et inversement) ;
- 2) l'efficacité de la Terre à utiliser cette énergie pour se chauffer.

Les paramètres influençant l'efficacité de la Terre à utiliser l'énergie solaire pour chauffer, sont principalement la concentration en gaz à effet de serre et la réflexion du rayonnement solaire vers l'Espace.

Si une grande partie du rayonnement solaire arrivant sur Terre est réfléchi vers l'Espace, il y aura forcément moins d'énergie disponible pour chauffer la Terre, et celle-ci sera plus froide. Ce qui influence la quantité d'énergie réfléchi par la Terre vers l'Espace, c'est sa couverture, sa surface. Par exemple, si la Terre était entièrement recouverte de glace, elle réfléchirait plus efficacement le rayonnement solaire et serait par conséquent plus froide.

En effet, certaines surfaces sont plus réfléchissantes que d'autres. La capacité à réfléchir un rayonnement lumineux par une surface est appelée albédo. L'albédo, c'est la fraction du rayonnement arrivant sur une surface, qui est directement réfléchi par celle-ci. De ce fait, plus l'albédo est grand, plus la surface est réfléchissante, et moins l'action du Soleil la réchauffera efficacement.

Comme nous le constatons au Tableau 1, les al-

Tableau 1 : Valeurs approximatives de l'albédo de différentes surfaces.

Type de surface	Albédo
Océan	8 %
Forêt de conifères	10 %
Glace	60 %
Neige fraîche	80 %

bédos de la glace et de la neige sont relativement élevés, tandis que ceux de l'océan ou d'une forêt sont plutôt faibles. Cela implique donc que plus il y a de glaciers, de calottes polaires, de banquise sur Terre, plus la radiation solaire est réfléchiée vers l'Espace, et, toute chose égale par ailleurs, plus il fait froid sur Terre.

## La théorie de Milankovitch

D'après ce qui précède, si les conditions sont favorables au développement de calottes polaires et de glaciers, cela contribuera à refroidir la Terre et donc à former encore plus de glaciers, etc. C'est donc un effet d'auto entraînement.

Pour que des calottes polaires et glaciers se forment, il faut que la neige qui s'est accumulée au cours de l'hiver ne fonde pas durant les saisons qui suivent, donc qu'elle résiste à l'été. En effet, le cas échéant, la neige de l'hiver suivant viendra s'ajouter à celle de l'hiver précédent. D'année en année, une calotte polaire ou un glacier se développera, ce qui contribuera à augmenter l'albédo de la Terre, à augmenter la part de réflexion du rayonnement solaire, et donc à refroidir la Terre.

Pour qu'une glaciation débute, il faut que l'insolation ne soit pas trop importante durant l'été aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord. Remarquez que c'est l'ensoleillement estival aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord qui est important. Le développement de calottes polaires est favorisé

- à des latitudes élevées, où il fait suffisamment froid pour que la neige puisse résister à l'été dans des conditions favorables ;
- par une surface continentale suffisamment étendue pouvant servir de support à ces calottes.

Comme la plus grande part de la surface continentale se trouve dans l'hémisphère Nord de la Terre, c'est l'ensoleillement estival aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord, plutôt que de l'hémisphère Sud, qui est important.

Dans la section suivante, nous allons voir que certains paramètres de l'orbite de la Terre influencent l'ensoleillement estival de l'hémisphère Nord.

## Les paramètres orbitaux de la Terre

L'orbite de la Terre correspond à son mouvement par rapport au Soleil. Il se fait que trois paramètres de ce mouvement ont une influence sur l'ensoleillement dans l'hémisphère Nord en été, ce qui favorise ou empêche l'entrée dans une période de glaciation, selon leurs configurations. Ces paramètres sont **l'excentricité, l'obliquité et la précession**.

### L'excentricité

Comme vous le savez peut-être, la trajectoire de la Terre autour du Soleil n'est pas circulaire. En effet, la Terre suit une trajectoire elliptique autour du Soleil, comme illustré à la Figure 1. L'excentricité d'une ellipse caractérise son aplatissement. Plus l'excentricité est grande, plus l'ellipse est aplatie. L'excentricité de l'orbite terrestre varie au cours du temps, elle augmente puis diminue périodiquement. Elle suit un cycle de 413.000 ans.

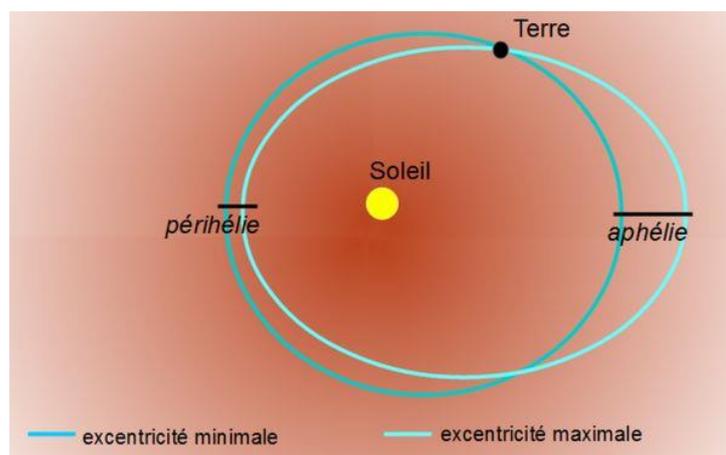


Figure 1 : Variation de l'excentricité de l'orbite de la Terre. (Source : [Yves Dandonneau](#), consultée le 25/02/2023.)

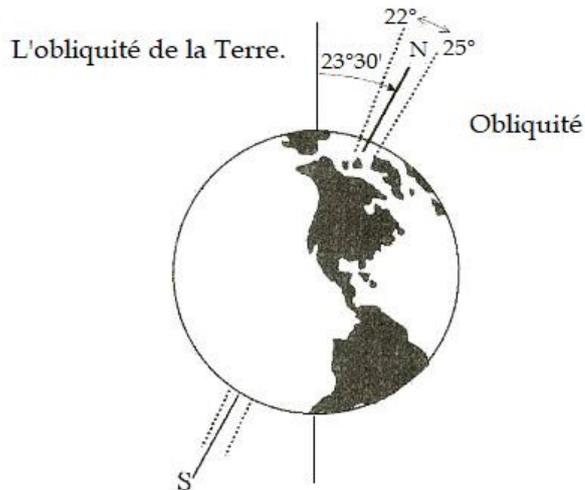


Figure 2 : Variation périodique de l'obliquité. (Source : [Tout sur les SVT](#), consultée le 25/02/2023)



Figure 3 : Illustration de la précession. (Source : [Wikipedia](#), consultée le 01/12/2022.)

### L'obliquité

L'axe de rotation de la Terre ne fait pas un angle droit avec le plan de son orbite autour du Soleil. Il s'en écarte de  $23^{\circ}30'$ . Cet angle porte le nom d'obliquité. C'est à cause de l'obliquité non nulle que nous connaissons plusieurs saisons au cours d'une année : plus elle est grande, plus les saisons sont marquées.

L'obliquité varie périodiquement au cours du temps, oscillant entre environ  $22^{\circ}$  et  $25^{\circ}$ , comme indiqué à la Figure 2, et suit un cycle d'environ 41.000 ans.

### La précession

Le mouvement de précession est un mouvement qui affecte l'axe de rotation de la Terre. En effet, ce dernier change continuellement d'orientation, exactement comme l'axe de rotation d'une toupie en mouvement.

Pour être un peu plus précis, la direction de l'axe de rotation de la Terre tourne autour de la droite perpendiculaire à la droite joignant le Soleil et le centre de la Terre. Ce mouvement est illustré à la Figure 3.

Les variations de ces trois paramètres (excentricité, obliquité et précession) sont dus à l'attraction gravifique de la Lune et des autres planètes du système solaire (principalement Jupiter et Saturne)

### Conclusion

En conclusion, nous avons vu que si la surface de la Terre occupée par des glaciers est importante, du fait du faible albédo de la glace, une plus grande partie de l'énergie solaire incidente est réfléchiée, ce qui implique qu'il fait plus froid sur Terre.

Pour que des calottes polaires importantes se développent, il faut que l'été ne soit pas trop chaud dans l'hémisphère Nord, où se situe la plus grande part de la surface continentale, et particulièrement aux hautes latitudes. Cela est possible si les paramètres orbitaux de la Terre sont « bien arrangés ». Dans ce cas, alors une période de glaciation peu débiter.

La Figure 4 fait le lien entre les paramètres orbitaux de la Terre et l'insolation aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord.

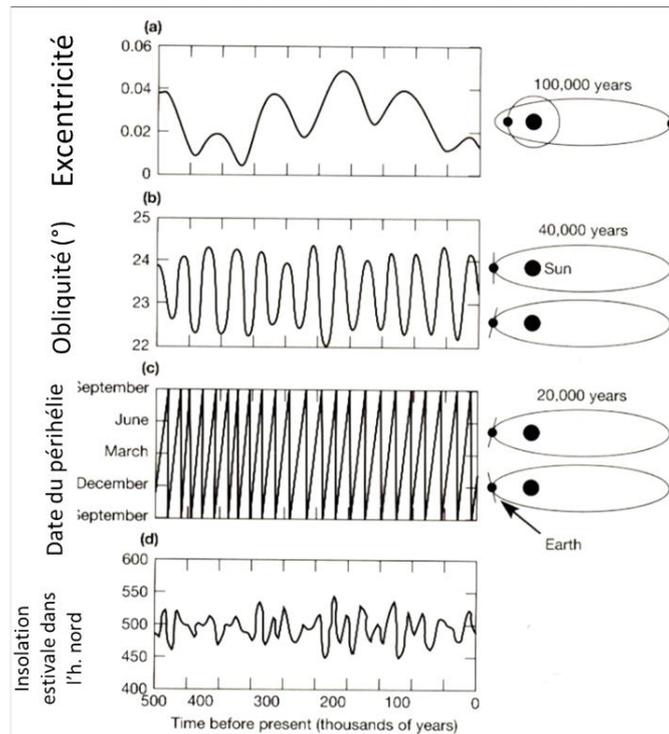


Figure 4 : Lien entre les paramètres orbitaux et l'insolation estivale aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord. (Source : L. François, support du cours « *Climate Change and Impacts* », ULiège, 2022-2023)

### Pour en savoir plus

- ScienceEtonnante (2016). Les cycles de Milankovitch et les changements climatiques. YouTube. <https://youtu.be/MXcY8Cf6hsI>. Consulté le 03/02/2023.
- Levrard, B. (2005). Cycles de Milankovitch et variations climatiques : dernières nouvelles. École Normale Supérieure de Lyon. <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/milankovitch-2005.xml>. Consulté le 06/02/2023.
- Wikipedia. (2023). Glaciations quaternaires. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Glaciations\\_quaternaires](https://fr.wikipedia.org/wiki/Glaciations_quaternaires). Consulté le 06/02/2023.
- Paillard, D. (2012). Climat et cycles astronomiques. Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement. <https://uma.ensta-paris.fr/conf/jeups/2011/talks/tipe2012-Paillard,Didier-chap7-vol2.pdf>. Consulté le 06/02/2023.

# Vénus : sœur jumelle de la Terre ?

Élise Hemmen

Master en sciences spatiales

## En quoi Vénus est-elle semblable à la Terre ?

Les huit planètes du Système solaire peuvent être distinguées en deux grandes catégories selon leur composition : les planètes dites telluriques sont celles qui possèdent une surface solide et sont constituées essentiellement de roches et de métaux, tandis que les planètes dites gazeuses, également appelées planètes joviennes, sont, par opposition aux planètes telluriques, celles qui possèdent une surface gazeuse et sont constituées essentiellement d'hydrogène et d'hélium. Les planètes les plus proches du Soleil, c'est-à-dire Mercure, Vénus, la Terre et Mars, sont des planètes telluriques, et les planètes les plus éloignées, c'est-à-dire Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune, sont des planètes gazeuses (Figure 1). La Terre et Vénus appartiennent donc à la même catégorie, et de nombreux points communs peuvent être établis entre les deux astres.

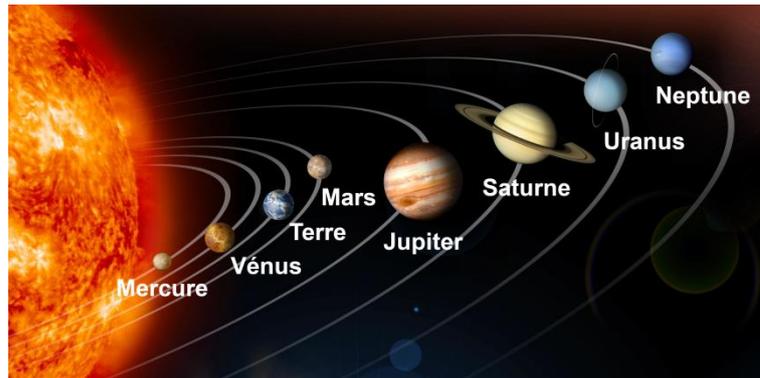


Figure 1 : Vue artistique du Système solaire.  
(Source : [JPL](#), adapté.)

Pour commencer, les deux planètes sont voisines. Vénus étant en orbite à une distance moyenne d'environ 108 millions de kilomètres du Soleil, elle est la deuxième planète la plus proche du Soleil. La Terre est la troisième, elle tourne autour du Soleil à une distance moyenne de presque 150 millions de kilomètres.

Ensuite, la Terre et Vénus sont similaires en termes de taille, de masse et de densité. En effet, notre planète est à peine plus grande et plus massive que sa voisine, comme indiqué dans le Tableau 1.

Enfin, les surfaces des deux astres ont des compositions assez semblables.

En effet, des analyses radar effectuées à l'aide de différentes sondes ont permis de découvrir que la croûte vénusienne est principalement constituée de roches basaltiques et de granite. Ces deux types de roches sont également retrouvés dans la croûte terrestre.

Ainsi, les deux planètes se ressemblent en plusieurs points, ce qui laisse les scientifiques penser qu'elles seraient nées de la même manière lors de la formation du Système solaire, il y a un peu plus de 4,5 milliards d'années. Elles sont, dès lors, souvent qualifiées de « sœurs jumelles ». Néanmoins, si elle était possible, la vie à la surface de Vénus serait nettement moins agréable que sur Terre.

Tableau 1 : Diamètre, masse et densité de la Terre et de Vénus.

	Terre	Vénus
Diamètre (km)	12.756	12.104
Masse (kg)	$5,98 \times 10^{24}$	$4,87 \times 10^{24}$
Densité (kg/m <sup>3</sup> )	5520	5250

Source des données : [www.esa.int](http://www.esa.int).

## En quoi Vénus est-elle si différente de la Terre ?

Bien que d'apparence semblable à la Terre, Vénus est en réalité bien différente, si l'on y regarde de plus près. Les climats des deux planètes sont complètement différents. Avec une température moyenne de 15°C à sa surface et une pression atmosphérique de 1 bar au niveau de la mer, notre planète peut abriter d'innombrables formes de vie. En revanche, les choses sont plus compliquées à la surface de la planète voisine (Figure 2). Cette dernière est la planète la plus chaude du Système solaire, bien qu'elle ne soit pas la plus proche du Soleil. Sa température moyenne de surface est de 465 °C et sa pression atmosphérique y est 92 fois plus élevée que sur Terre. Dès lors, si un humain était placé à la surface de Vénus, il serait écrasé par l'atmosphère. Évidemment, dans de telles conditions, il ne peut exister ni eau liquide ni glace. Dès lors, l'eau présente sur la planète se trouve uniquement sous forme de gaz dans l'atmosphère, et son abondance est environ 100.000 fois plus faible que l'abondance totale de l'eau trouvée dans l'atmosphère et les océans terrestres.

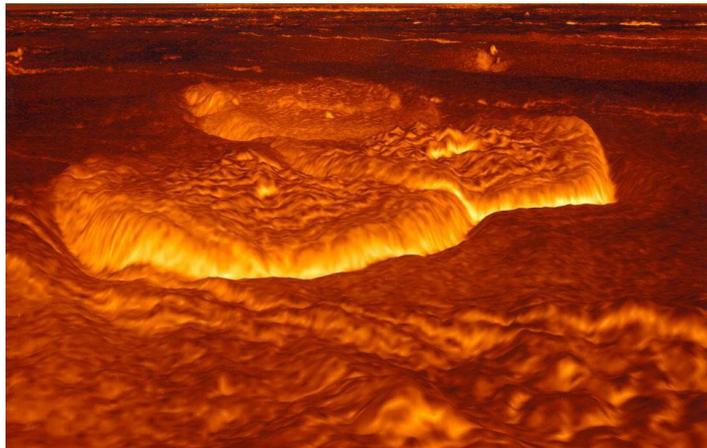


Figure 2 : Image radar de la surface de Vénus prise par le satellite Magellan. (Source : [NASA](#).)

L'atmosphère de Vénus est très distincte de celle de la Terre. Leur compositions chimiques et leurs densités sont radicalement différentes, ce qui constitue la principale cause de la disparité observée entre les climats des deux planètes. En effet, l'atmosphère terrestre contient environ 78 % d'azote et 21 % d'oxygène, ainsi que de nombreux autres composés en quantités moindres, tels que de la vapeur d'eau ou du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), par exemple. L'atmosphère de Vénus est, quant à elle, composée de 96 % de CO<sub>2</sub>, de seulement 3 % d'azote, et de faibles quantités d'autres espèces chimiques, comme de la vapeur d'eau. Elle comporte une très grande quantité de nuages opaques, formés principalement d'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), provoquant des pluies acides fréquentes. Ces nuages recouvrent toute la planète sur une large épaisseur et font qu'il est impossible d'en observer la surface depuis l'Espace.

Ces conditions hostiles empêchent le développement de toute forme de vie à la surface de Vénus (du moins, telle que nous la connaissons). Cependant, cela n'aurait pas toujours été le cas.

## Dans le passé, Vénus et la Terre étaient de vraies jumelles

De nombreux modèles climatiques permettent, entre autres, de retracer de manière hypothétique le climat passé des planètes et leur évolution, en se basant sur des observations et des mesures réalisées par les satellites. Selon certains modèles récents, Vénus aurait été habitable pendant longtemps, avant que son système climatique ne change drastiquement. Ces modèles suggèrent en effet que, avant ce changement, la planète était plus semblable à sa sœur, la Terre. La température à sa surface était nettement plus proche de la température actuelle de la Terre, et l'eau y était beaucoup plus abondante. Des océans d'une profondeur assez importante étaient également présents à la surface de la planète, permettant au cycle de l'eau de s'établir.

Par la suite, le climat de Vénus aurait évolué en divergeant de celui de la Terre, et la planète serait finalement devenue excessivement chaude et sèche, telle que nous la connaissons à actuellement.

## D'où provient la disparité observée aujourd'hui ?

L'abondance élevée du CO<sub>2</sub> et des nuages épais de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> observées dans l'atmosphère vénusienne semble être le résultat d'une période d'activité volcanique très intense qu'aurait subi la planète il y a moins d'un milliard d'années, provoquant un changement soudain du système climatique. Cette période aurait été assez courte à l'échelle des temps géologiques (environ un million d'années, d'après certains modèles climatiques), mais le volcanisme important qui aurait régné impliquait plusieurs milliers de volcans répartis sur toute la surface de la planète. Ainsi, il aurait permis la libération de très grandes quantités de lave sur le sol, ainsi que de CO<sub>2</sub> et de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> gazeux dans l'atmosphère.

Les nombreux nuages formés auraient constitué une sorte de piège pour le rayonnement émis par surface de Vénus, empêchant ce dernier de s'échapper vers l'Espace. Ce phénomène, appelé « effet de serre » (Figure 3), serait à l'origine de la température si élevée mesurée sur notre planète voisine.

En effet, au plus les gaz devenaient abondants dans l'atmosphère de Vénus, au plus l'effet de serre devenait considérable. La température aurait alors fortement augmenté, jusqu'à ce que l'eau contenue dans les océans ne puisse plus subsister sous forme liquide, s'évapore dans l'atmosphère, et contribue à son tour à l'accentuation de l'effet de serre et l'augmentation de la température. Ensuite, des quantités importantes de vapeur d'eau se seraient échappées de l'atmosphère, d'où sa faible abondance observée actuellement dans les nuages. Le cycle de l'eau se serait donc arrêté, la planète se serait complètement asséchée et son atmosphère serait devenue si dense qu'elle ne pouvait plus se refroidir. La température aurait ainsi continué d'augmenter, jusqu'à atteindre la valeur de 465 °C mesurée aujourd'hui.

À l'heure actuelle, la surface de Vénus serait nettement moins active qu'elle ne l'était durant cette période. Des chercheurs ont tenté de déterminer l'âge des roches magmatiques, dont la présence à la surface de la planète est due au refroidissement et à la solidification de la lave. Cependant, les conditions de température et de pression extrêmes qui règnent dans cet environnement rendent les observations et les mesures compliquées, les atterrisseurs ne pouvant y récolter des données que pendant quelques dizaines à une centaine de minutes avant d'être détruits. Néanmoins, les résultats qui ont été obtenus grâce à plusieurs sondes en orbite autour de Vénus suggèrent que les roches magmatiques de certaines régions de la surface, notamment au sommet du volcan *Idunn Mons*, dateraient de moins de 10.000 ans, indiquant que des volcans sont probablement encore actifs, ou l'ont été récemment. Ce sont les éruptions provoquées par ces quelques volcans encore en activité qui permettraient de maintenir le climat extrêmement chaud et sec de Vénus.

## En conclusion

Vénus et la Terre sont souvent identifiées comme des sœurs jumelles, principalement parce qu'elles ont été formées dans la même région du Système solaire, probablement de la même manière, et qu'elles sont donc très similaires en termes de masse, de volume et de composition. Pendant une grande partie de leur évolution, ces deux astres ont probablement également connu des climats semblables, et auraient tous deux présenté des conditions favorables au développement de la vie à leur surface. Cependant, récemment, le climat de Vénus aurait pris un chemin

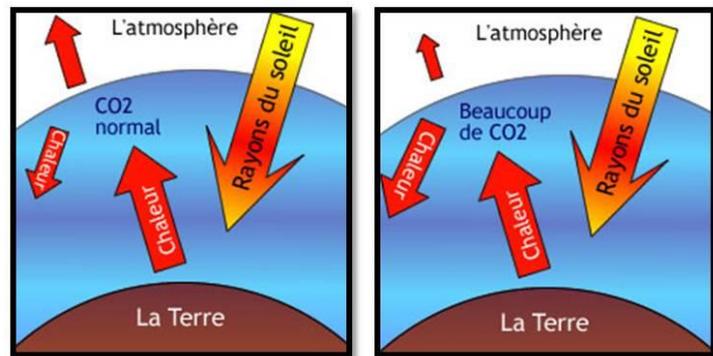


Figure 3 : Schéma simplifié du principe de l'effet de serre. (Source : [effetdeserreetcyclesbiochimiques.weebly.com](http://effetdeserreetcyclesbiochimiques.weebly.com).)

différent de celui de la Terre, et la planète serait devenue un véritable enfer. Une période très intense de volcanisme aurait conduit à une intensification considérable de l'effet de serre sur Vénus, qui aurait été à l'origine d'une augmentation importante de température, rendant la surface de la planète extrêmement chaude et sèche. Aujourd'hui, malgré leur apparence semblable, les planètes sont radicalement différentes et n'ont en réalité rien de deux sœurs jumelles.

### Pour en savoir plus

- Vénus, la sœur jumelle de la Terre. <https://www.aeronomie.be/fr/encyclopedie/venus-soeur-jumelle-terre>
- En vidéo : Vénus, la planète brûlante à l'atmosphère mortelle. <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/venus-venus-planete-brulante-atmosphere-mortelle-91700>
- Vénus aurait été habitable jusqu'à un grand bouleversement il y a 715 millions d'années. <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/venus-venus-auroit-ete-habitable-jusqua-grand-bouleversement-il-y-715-millions-annees-63885>
- *All about Venus*. <https://spaceplace.nasa.gov/all-about-venus/en> (en anglais)

# Le méthane (CH<sub>4</sub>) : l'ami du CO<sub>2</sub> dont on ne parle pas assez ?

Denis Cariat

Master en sciences géographiques — orientation « Global Change »

## Contexte : l'effet de serre et les principaux gaz à effet de serre

Les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dont on entend parler quotidiennement ne sont pas l'unique source de gaz à effet de serre (GES). De nombreux autres GES existent et se différencient par leurs concentrations dans l'atmosphère, leurs pouvoirs de réchauffement global, leurs durées de vie dans l'atmosphère, leurs sources (naturelles et anthropiques) et leurs processus de destruction. La Figure 1 décrit l'évolution des émissions annuelles des différents GES en milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> équivalentes.<sup>2</sup> En 2019, le CO<sub>2</sub> issu des processus industriels et des énergies fossiles représentait 64 % des émissions, le CO<sub>2</sub> issu du changement d'affectation des sols (p. ex., déforestation) 11 %, le méthane (CH<sub>4</sub>) 18 %, le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) 4 % et de multiples gaz fluorés (*F-gases* en anglais) 2 % des émissions. Nous allons ici faire un zoom sur le méthane.

## Zoom sur le méthane (CH<sub>4</sub>)

Comme expliqué dans la section précédente, le méthane (CH<sub>4</sub>) représente 18 % des émissions annuelles, ce qui en fait le second GES après le CO<sub>2</sub>. Quel est l'impact de ces émissions croissantes depuis la révolution industrielle ? Comme le montre la Figure 2, la concentration atmosphérique de méthane a bondi de 1644 ppb (*parts per billion* en anglais, parts par milliard en français) en 1984 à 1915 ppb en septembre 2022, soit une augmentation de 16 % sur cette période. L'augmentation est d'autant plus impressionnante si on compare la concentration actuelle à celle du début de l'ère industrielle — 750 ppb — soit une augmentation de 155 % depuis 1750. Pour comprendre cette augmentation importante de la concentration atmosphérique de méthane, il faut analyser les différents flux : les sources de production de méthane (naturelles et anthropiques) ainsi que les différents processus de destruction de celui-ci.

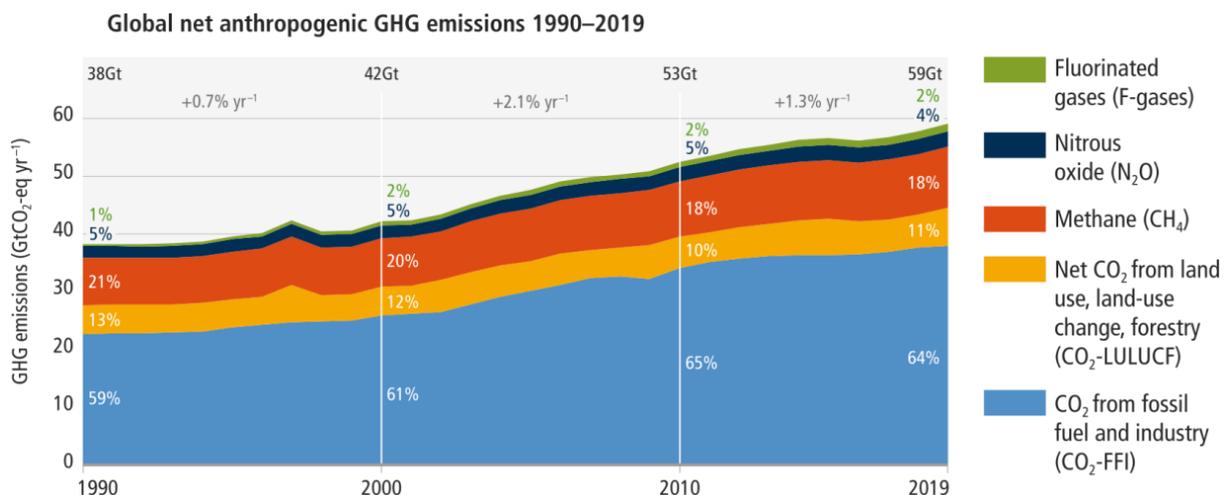


Figure 1 : Émissions mondiales nettes de gaz à effet de serre anthropiques sur la période 1990-2019 (Source : [GIEC AR6-WG3 SPM, 2022.](#))

<sup>2</sup> Les différents gaz et leurs caractéristiques sont ramenés en équivalents CO<sub>2</sub> pour permettre leur comparaison.

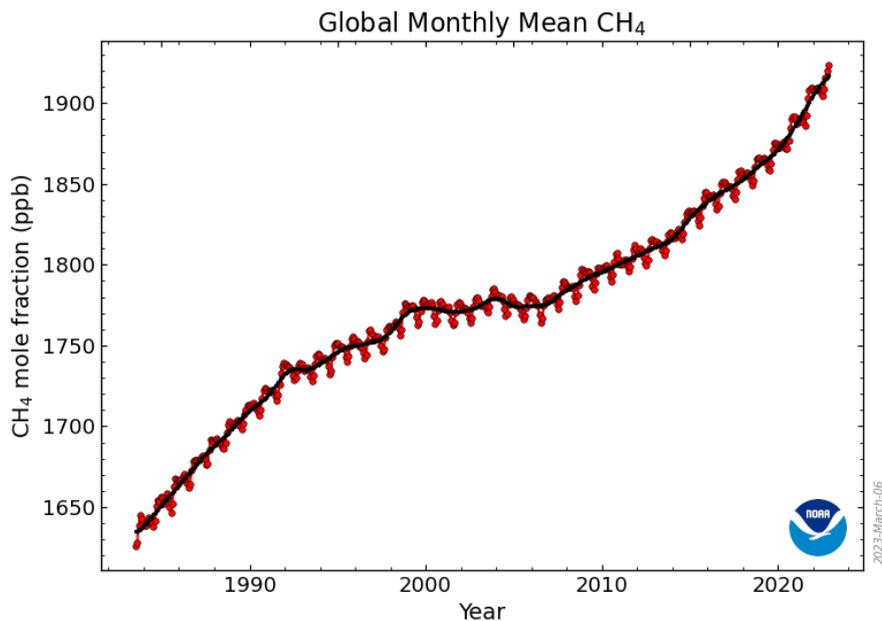


Figure 2 : Évolution de la concentration moyenne mensuelle globale du méthane dans l'atmosphère entre 1983 et 2022. (Source : [NOAA, 2022.](#))

## Le méthane : processus de production et processus de destruction

La Figure 3, issue du dernier rapport d'évaluation du GIEC,<sup>3</sup> décrit les différents stocks et flux de méthane, exprimés en téragrammes (soit  $10^{12}$  grammes), resp. téragrammes par an. Voici une description de cette figure.

### Les stocks (les ronds blancs sur la figure, de gauche à droite)

- les hydrates de méthane emprisonnés dans le permafrost (sols gelés en permanence) ;
- les réserves de gaz « naturel » (puisés pour divers usages : industrie, chauffage...) ;
- les hydrates de méthane emprisonnés dans les sédiments des fonds marins.

### Les sources naturelles de méthane (les flèches vertes montantes, de gauche à droite)

- les sources géologiques : sources géothermiques, volcans de boue... ;
- les termites : insectes produisant du méthane lors de la digestion de matières organiques ;
- les surfaces d'eau douce, les zones humides et les océans : dans certaines conditions pauvres en oxygène, les réactions chimiques y favorisent la production de méthane.

### Les sources anthropiques de méthane (les flèches rouges montantes de gauche à droite)

- les énergies fossiles : les émissions causées par les fuites lors de l'extraction, du transport et de l'utilisation des combustibles fossiles ;
- les déchets : les émissions lors de leur traitement et de leur accumulation dans les décharges ;
- la culture du riz en champs inondés favorise la production de méthane ;
- les élevages de bétail : la digestion des ruminants, principalement des bœufs, génère des quantités très importantes de méthane.

### Les sources hybrides de méthane (l'unique flèche verte et rouge montante)

- la combustion de la biomasse (végétaux) peut être à la fois naturelle (p. ex., feux naturels) ou anthropique (p. ex., combustion de déchets organiques).

<sup>3</sup> Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC)

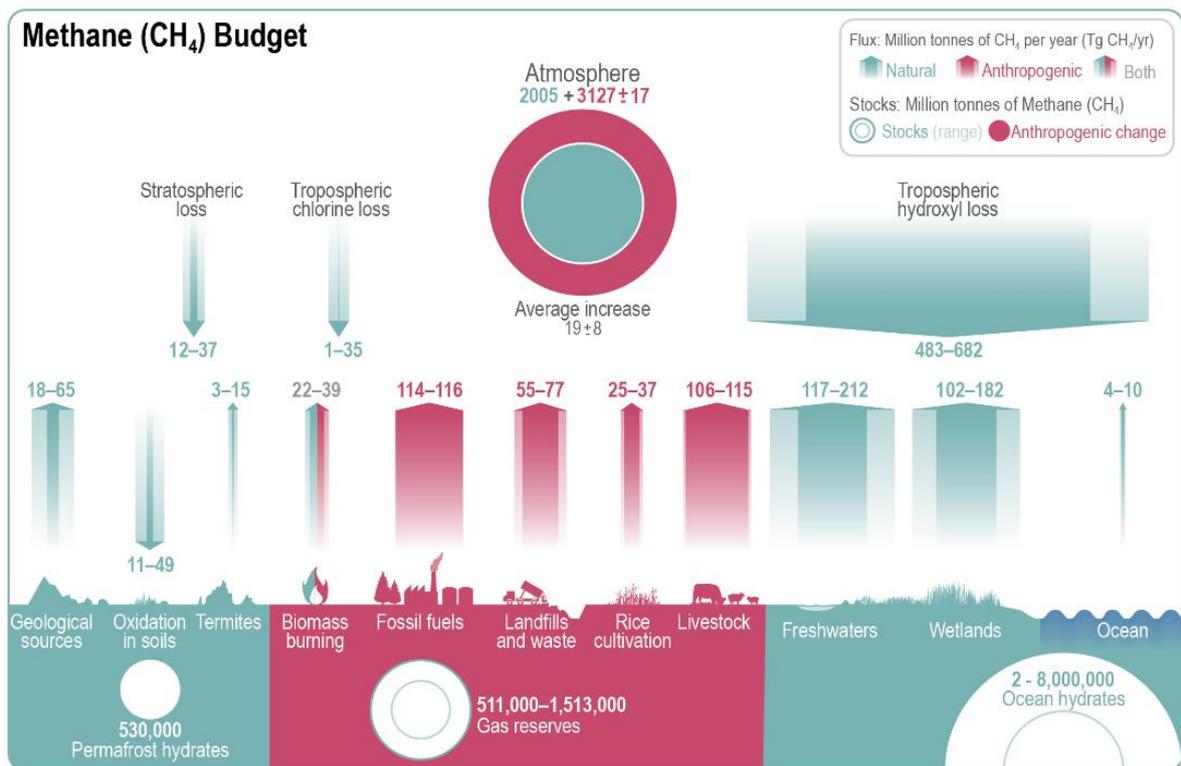


Figure 3 : Bilan global du méthane (CH<sub>4</sub>) sur la période 2008-2017. Valeurs en Tg (téragramme), resp. Tg/an. (Source : [GIEC AR6-WG1, 2021](#))

### Les processus de destruction du méthane

Ce sont des processus naturels complexes pendant lesquels le méthane réagit avec d'autres composés de l'atmosphère ou avec des composés à la surface de la Terre (flèches bleues descendantes, de gauche à droite) :

- via l'oxydation dans les sols ;
- via la destruction dans la stratosphère (couche de l'atmosphère comprise entre 10 et 50 km au-dessus de la surface terrestre) ;
- via la destruction dans la troposphère (couche de 10 km au-dessus du sol) grâce à la réaction avec des molécules de chlore ;
- via la destruction dans la troposphère grâce à une réaction avec le radical hydroxyle (ce processus représente 90 % de la destruction de méthane, voire plus).

Le bilan de ces différents flux et l'augmentation progressive des flux anthropiques sur la période 2008-2017, engendrent une augmentation approximative du stock atmosphérique de 3127 millions de tonnes de méthane. Ceci explique l'augmentation, sur la période concernée, des concentrations atmosphériques décrites sur la Figure 2.

### Pourquoi agir rapidement sur le méthane est intéressant pour limiter le réchauffement climatique ?

Comme expliqué dans l'introduction, les GES se distinguent également par leur concentration dans l'atmosphère, leur durée de vie et leur pouvoir de réchauffement. Sur base de ces critères, le méthane est très différent du CO<sub>2</sub> (voir Tableau 1). Le pouvoir de réchauffement global (PRG) est calculé par rapport à celui du CO<sub>2</sub>.

Avec un pouvoir de réchauffement global plus élevé et une durée de vie plus courte que le CO<sub>2</sub>, agir rapidement sur les émissions de méthane est donc une opportunité non-négligeable de ralentir voire réduire le réchauffement climatique dans un délai relativement court. Néanmoins, le méthane représentant uniquement 18 % des émissions de GES, cela ne doit pas nous

Tableau 1 Concentrations atmosphériques ([NOAA](#)), durées de vie et pouvoirs de réchauffement global ([GIEC AR6-WG1, 2021](#)) pour le CO<sub>2</sub> et le CH<sub>4</sub>.

Gaz	Concentration atmosphérique	Durée de vie dans l'atmosphère	Pouvoir de réchauffement global sur 100 ans
CO <sub>2</sub>	419 ppm (en déc. 2022)	Valeurs multiples pouvant aller jusqu'à plusieurs millénaires <sup>†</sup>	1 (référence)
CH <sub>4</sub>	1915 ppb (en nov. 2022)	Environ 12 ans	Environ 27 à 30 fois plus puissant que le CO <sub>2</sub>

<sup>†</sup> 300 à 1000 ans suivant la NASA.

éloigner de l'objectif principal de réduction rapide des émissions de CO<sub>2</sub> (75% des émissions totales, voir Figure 1).

### Comment agir sur le méthane dans notre lutte contre le changement climatique ?

Lors de la COP 26 à Glasgow, conscients du rôle potentiel de la réduction rapide de méthane, les décideurs politiques de plus de 130 pays ont signé le *Global Methane Pledge* (ou « engagement mondial pour le méthane », en français) visant à réduire les émissions de méthane d'au moins 30 % d'ici 2030, avec un potentiel de refroidissement de la température mondiale de 0,2 °C d'ici 2050. Parmi les solutions pour lutter contre les émissions de méthane, les technologies satellitaires actuelles sont capables de détecter, de quantifier et de surveiller les fuites de méthane depuis l'Espace. Des études identifient de nombreuses fuites qui semblent être dues à des infrastructures insuffisantes pour l'extraction, le traitement et le transport du gaz naturel, provoquant des émissions élevées de méthane. Ce type d'analyses devrait encourager les industries et les gouvernements à élaborer des actions ciblées et rapides.

### Conclusion

Parmi les différents gaz à effet de serre, le méthane se distingue à la fois par un pouvoir de réchauffement global plus élevé et une durée de vie dans l'atmosphère plus courte que le CO<sub>2</sub>, ce qui en fait un levier important dans la limitation et la réduction du réchauffement climatique. Conscients de cela, plus de 150 pays se sont jusqu'à présent engagés, ou sont en train de le faire, à réduire leurs émissions de méthane de 30 % d'ici 2030 avec un potentiel de refroidissement de la température mondiale de 0,2 °C d'ici 2050. Différentes solutions existent pour y arriver, dont la détection satellitaire des fuites de méthane.

### Pour en savoir plus

- Vidéo explicative et didactique de l'effet de serre : <https://youtu.be/g21fiXIR47g>
- Description simple des sources de méthane et des différents gaz à effet de serre : <https://climat.be/changements-climatiques/causes/gaz-a-effet-de-serre>
- Engagement de plus de 130 états pour diminuer leurs émissions de méthane de 30 % d'ici 2030 (Clear Air Task Force, 2021) : <https://www.catf.us/fr/methane/pledge/#:~:text=L'engagement%20mondial%20en%20faveur,du%20m%C3%A9thane%20pour%20le%20climat> (voir aussi <https://www.globalmethanepledge.org>, en anglais)
- Le rapport du GIEC destiné aux décideurs (groupe 1) sur l'évolution du climat et l'analyse des différents GES (GIEC, 2021) : [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WG1\\_SPM\\_French.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_French.pdf)
- Évolution des concentrations atmosphériques du méthane et des autres principaux GES (NOAA, en anglais) : <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends>

# Connais-tu ton empreinte carbone ?

Elsa Blond Hanten

Master en sciences spatiales

## Les gaz à effet de serre

Les gaz à effet de serre (GES) sont les gaz présents dans notre atmosphère qui ont pour effet de réchauffer notre planète. Certains protocoles ont été mis en place pour tenter de réduire les émissions de ces gaz ; le Protocole de Kyoto en est un. Ce dernier a été signé en 1997 et ratifié par plus de 180 pays et se concentre sur six gaz à effet de serre : le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), le méthane ( $\text{CH}_4$ ), le protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ), les hydrofluorocarbures (HFC), les perfluorocarbures (PFC) et l'hexafluorure de soufre ( $\text{SF}_6$ ). Les trois premiers sont des gaz naturels tandis que les trois derniers sont industriels. Il existe encore d'autres gaz à effet de serre, comme la vapeur d'eau, ou l'ozone.

Ce sont ces gaz qui déterminent l'empreinte carbone de chaque individu. La notion d'empreinte carbone n'est pas clairement définie, mais il est courant de la mesurer en tenant compte de toutes les émissions de gaz à effet de serre et de convertir celles-ci en kilogrammes de  $\text{CO}_2$  équivalent. Nous utiliserons cette dernière définition par la suite.

La Figure 1 montre l'évolution des GES en Belgique depuis 1990. Les émissions ont tendance à baisser, mais les problèmes liés au changement climatique ne sont pas réglés pour autant. En effet, même si les émissions de GES diminuent, la quantité de ces gaz présente dans l'atmosphère continue à augmenter. Ceci est dû au fait que notre planète ne peut pas absorber les GES à la vitesse à laquelle ils sont émis. Cela mène à un surplus de GES dans l'atmosphère qui tend à réchauffer la planète.

Cette tendance à la hausse des GES a des effets dévastateurs sur notre planète. Lorsqu'on évoque le changement climatique, souvent des images de régions lointaines comme des petites îles qui sont inondées ou les glaces qui fondent aux pôles, nous viennent spontanément à l'esprit. Pourtant, il suffit de consulter les données récoltées en Belgique pour constater que nous sommes également impactés par ces changements. En effet, depuis 1890, la température

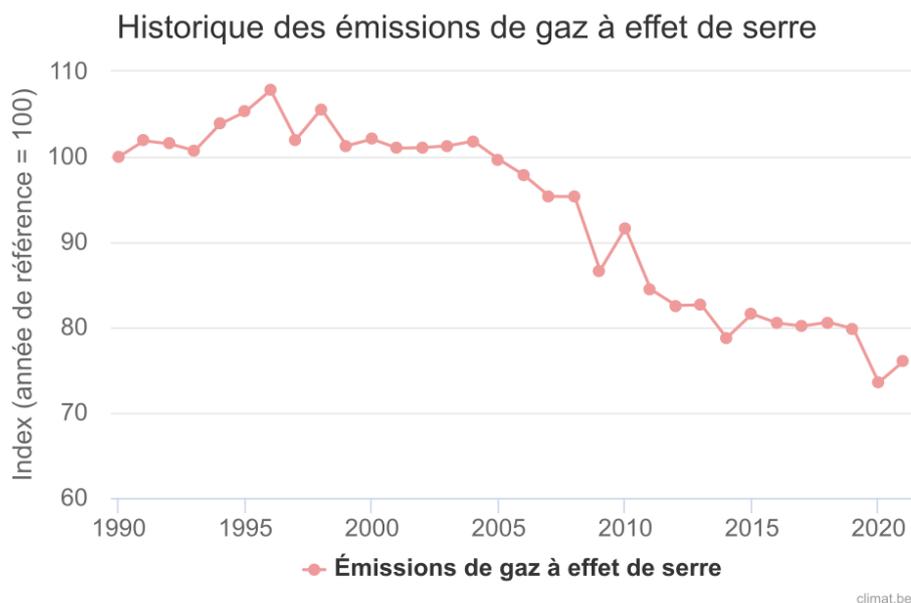
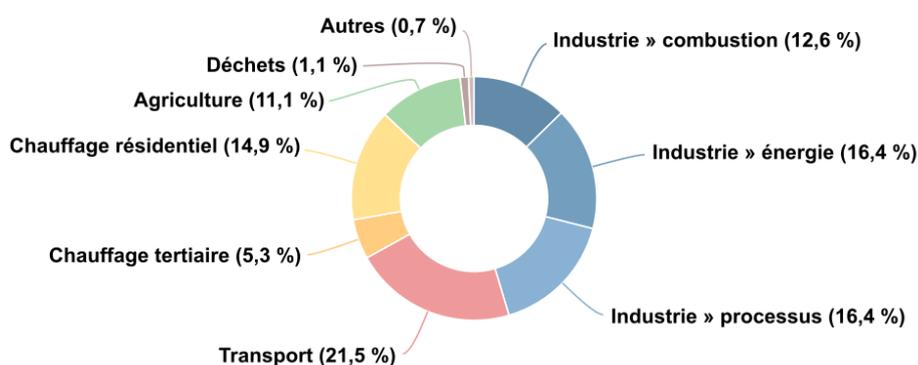


Figure 1 : Historique des émissions de GES en Belgique (Source : modifié de [climat.be](https://climat.be), consulté le 03.04.2023)

## Part des différents secteurs dans les émissions totales en Belgique en 2021



climat.be

Figure 2 : Part des différents secteurs dans les émissions totales en Belgique en 2021 (Source : adapté de [climat.be](https://www.climat.be))

moyenne annuelle a augmenté de 1,9 °C en Belgique. Les fréquences et intensités de précipitation subissent également un changement. Les printemps ont tendance à devenir plus secs, tandis que la fréquence de jours de pluie abondante, c'est-à-dire des jours où il y a plus de 20 mm de précipitation, augmente. Quant au niveau de la mer, on constate qu'il a augmenté 'un peu plus de 11 cm à Ostende depuis 1950.

### L'empreinte carbone et comment la réduire

La Figure 2 montre la répartition des émissions de GES des différents secteurs en Belgique en 2021. À première vue, le transport présente le taux le plus élevé, mais si l'on considère l'industrie dans son ensemble, c'est-à-dire la combustion, l'énergie et les processus de l'industrie combinés, alors c'est cette dernière qui affiche le taux le plus élevé. Cependant, il est intéressant de noter que les émissions de GES ont diminué de manière considérable dans le secteur de l'industrie depuis 1990, en raison de la fermeture de nombreuses usines. Les autres secteurs présentant une baisse de leurs émissions de GES sont le chauffage résidentiel, l'agriculture et les déchets, tandis que le transport et le chauffage tertiaire ont augmenté leurs émissions depuis 1990.

L'alimentation et la mobilité sont deux domaines où les individus peuvent directement agir sur leur empreinte carbone en adoptant des changements de comportement dans leur vie quotidienne. Nous allons nous intéresser plus en détail aux émissions de GES liés à ces deux secteurs, afin d'envisager des pistes pour réduire ces émissions.

#### La mobilité

Les transports sont responsables de 21,5 % des émissions en 2021 (voir Figure 1), parmi lesquels 96 % représentent les transports routiers. Il est possible d'estimer la future évolution des émissions liées aux transports. Le Tableau 1 présente les émissions moyennes en gaz à effet de serre liées à différents moyens de transport et leurs évolutions prédites

Tableau 1 : Projection des émissions de GES dans le secteur des transports au Luxembourg.

g CO <sub>2</sub> eq/ passager-km	2021	2025
Voiture	222	53
Bus	80	40
Tram	21	15
Train	59	40
Aviation	206	150
Vélo	12	19
Marche	0	0

Source de données : [www.list.lu](http://www.list.lu)

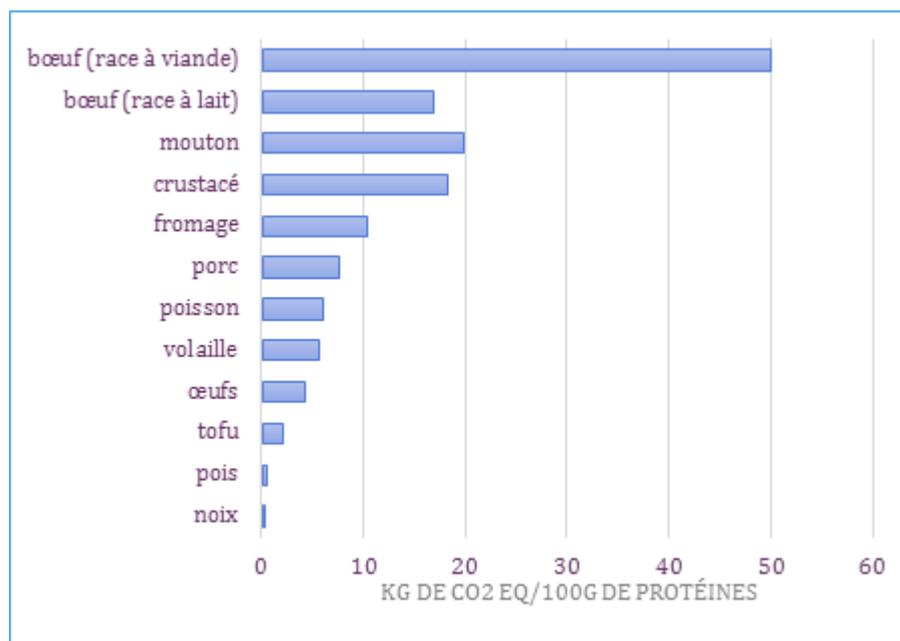


Figure 3 : Les émissions pour différentes sources de protéines (Source de données : [ourworldindata.org](http://ourworldindata.org))

jusqu'en 2050 au Grand-Duché de Luxembourg. Ces données sont exprimées en g CO<sub>2</sub> eq/passager-km. Le passager-km représente un passager transporté sur un km et permet de tenir compte du nombre de personnes par véhicule.

Regardons plus en détail la voiture qui accompagne la plupart des personnes dans leur quotidien. D'ici 2050, il est prévu qu'elle passe de 222 à 53 grammes de CO<sub>2</sub> équivalent par passager-km. Cette forte baisse survient grâce au passage aux voitures électriques et à la décarbonation du réseau électrique. Ces changements sont aussi responsables de la baisse pour le bus. Il est curieux de remarquer que le vélo est le seul moyen de transport pour lequel les émissions de GES augmenteront. En effet, de plus en plus de vélos seront électriques, ce qui fait augmenter les émissions, essentiellement liés à leur fabrication.

L'avion est un moyen de transport courant pour partir en vacances, mais connaissez-vous l'impact des voyages aériens sur le réchauffement climatique ? En comparant les émissions de l'avion et du train, pour des destinations accessibles en train, les résultats montrent que le train a dans tous les cas une empreinte carbone largement inférieure à celle de l'avion. Ainsi, pour réduire notre empreinte carbone pour les transports, il serait judicieux d'opter pour les transports en commun aussi bien dans notre quotidien, que lorsque nous planifions nos prochaines vacances.

## L'alimentation

Vous connaissez peut-être quelqu'un dans votre entourage qui s'alimente de manière végétarienne ou végétalienne, en raison de l'impact que la consommation de produits animaliers peut avoir sur les émissions de GES. Peut-être aussi que vous vous êtes déjà posé la question de savoir si manger moins ou plus du tout de viande a réellement un impact considérable sur l'environnement. Voici quelques données qui vont aider à répondre à cette question.

D'abord, l'alimentation représente 19 % du total des émissions de GES (au Luxembourg) et 82 % des émissions liées à l'alimentation correspondent à l'exploitation agricole. Les 18 % restants vont sur le compte de la transformation, du transport, de l'emballage et de la vente au détail. Ensuite, il est intéressant de comparer différentes sources de protéines et leur émission de GES.

La Figure 3 rapporte les quantités de GES émises pour produire 100 g de protéines à partir de différentes sources (émissions de GES exprimées en kilogrammes de CO<sub>2</sub> équivalent).

La valeur la plus remarquable est clairement celle de la viande de bœuf. En effet, cette dernière requiert largement plus d'émissions de GES que les autres sources de protéines. Mais regardons ce qu'il en est pour d'autres sources de protéines : en général, les sources d'origine animale émettent davantage de GES que celles d'origine végétale, comme les noix, les pois et le tofu. Les principales émissions de GES liées à l'agriculture sont le méthane et le protoxyde d'azote. Le méthane est produit par la décomposition de la matière organique des fumiers et par l'appareil digestif des ruminants, tandis que le protoxyde d'azote est aussi produit par les fumiers, mais également par la (sur-)fertilisation des sols.

Que pouvons-nous changer à notre alimentation si nous souhaitons réduire notre empreinte carbone ? Pour l'instant, notre consommation moyenne journalière de viande est plus que le double de la quantité recommandée. Suivre les recommandations diététiques réduirait de 30 % les émissions de GES liées à l'alimentation. Plus efficace encore, une alimentation végétarienne ou végétalienne diminuerait les émissions de 47 % et 51 % respectivement.

## Conclusion

Réduire son empreinte carbone est une manière pour chaque individu de contribuer à la lutte contre le changement climatique. Cette réduction est possible à travers des changements dans divers domaines de la vie de tous les jours. Consommer moins de viande ou prendre les transports en commun sont des exemples de modification des habitudes permettant de réduire les émissions de GES. À part la mobilité et l'alimentation, le chauffage et la consommation de biens comme les vêtements ou les produits hygiéniques sont des domaines susceptibles d'être améliorés.

Vous pouvez calculer votre empreinte carbone en suivant un des liens renseignés dans la section « Pour en savoir plus » ci-dessous.

## Pour en savoir plus

- <https://climat.be>
- <https://carbonerd.list.lu>
- <https://www.footprintcalculator.org/home/en> (en anglais)
- <https://www.projetpangolin.com/empreinte-carbone>