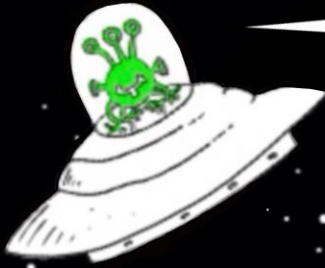


François Louchet et Serge Castel



m 🖐️ m ♦️ ❄️ ✂️ ◻️ ⋈ m ■♦️

*Ils sont fous ces Terriens

CLIMAT...



le saut dans l'inconnu?

Une dernière BD avant le basculement ?

CLIMAT ... le saut dans l'inconnu ?

... Ce qu'en dit la Physique !

On fait la science avec des faits, comme on fait une maison
avec des pierres , mais une accumulation de faits n'est pas plus
une science qu'un tas de pierres n'est une maison
(Henri Poincaré)

La Physique c'est rechercher l'invisible simple
derrière le visible compliqué
(Jean Perrin)



Avec Ours, Manchot,
Lulu la brebis, le Berger, Toby le Chien, la Mouette rieuse,
et le Professeur Eiffel !

Sommaire

Les auteurs	4
Préface : Je ne sais pas ce qui se passe...	5
1. Introduction	6
2. Où diable le changement climatique nous emmène-t-il ?	9
3. Comment fonctionne le climat	20
4. Ce qui nous attend maintenant	28
4.1. Ça passe ou ça casse ?	29
4.2. Ce que prévoit la science et ce que nous dit la nature	34
4.2.1. Simulations Numériques	39
4.2.2. Points de bascule et signaux annonciateurs	44
5. Et maintenant que peut-on faire ?	76
5.1. Où en sommes-nous exactement ?	77
5.2. Entre contrôle du climat et résilience ?	81
5.3. Comment produit-on l'électricité ?	84
5.4. Le chauffage	111
5.5. Le transport	121
5.6. Biodiversité et alimentation	132
6, Conclusion	137
Epilogue	140
Références	143
Remerciements	146

Les auteurs

Cette BD (ou plutôt ce « Récit Graphique », a été réalisé par deux scientifiques, François Louchet et Serge Castel.

Le premier (FL) est Ingénieur des Mines, agrégé de Physique et Docteur ès Sciences en Physique de la Matière Condensée. Il a été Professeur des Universités à l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), et a mené ses travaux de recherche au Laboratoire de Thermodynamique et de Physico-chimie Métallurgique de l'INPG, puis au Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement de Grenoble.

Il a en outre été Professeur Invité à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Guest Scientist au « Los Alamos National Laboratory » (Department of Energy, USA), à l'Université McMaster (Hamilton, Canada), à l'Université de Prague (République Tchèque), à l'Institut Balseiro (Comision Nacional de Energia Atómica, Argentine), et « OCMR Distinguished Lecturer » aux universités de Hamilton (McMaster), de Toronto et de Kingston (Canada).

Il travaille depuis près de 30 ans en Théorie des Systèmes Dynamiques, et a appliqué ces outils mathématiques à de nombreux problèmes, comme les avalanches de dislocations dans les solides cristallins, les avalanches de neige, la propagation des épidémies contagieuses, et le climat.

Le second (SC) est Ingénieur chimiste. Après des études à Strasbourg et à Delft (Pays Bas), il a mené une carrière au sein de grandes entreprises internationales du secteur de la chimie, et a occupé des fonctions dans le développement des procédés, la production, l'excellence opérationnelle et la gestion du changement. SC est aussi « Lean Six Sigma Master Black Belt ».

A temps perdu, il dessine et peint à l'aquarelle et s'exerce au dessin humoristique.

Dédicace

Nous dédions ce livre à la mémoire d'Hubert Reeves et de Joseph Blanc.

Lorsque l'un de nous (FL) avait publié son premier article sur l'évolution du climat en 2016, il en avait envoyé une copie à Hubert Reeves. Hubert y avait répondu par un billet dans sa revue Humanité & Biodiversité (<http://www.humanite-biodiversite.fr/article/hubert-reeves-s-interroge>), où il soulignait l'importance de cette approche en termes de point critique et de basculement, qui mettait en garde sur l'imminence de ce basculement et l'amplitude du saut de température associé. Merci Hubert. Quelle tristesse de ne plus pouvoir poursuivre ces échanges.

Joseph Blanc était chercheur en Physico-chimie théorique à Princeton, et ami très proche de FL, avec qui il avait eu de nombreuses discussions scientifiques, plus particulièrement en thermodynamique, mais aussi sur la criticité et le climat durant ces dernières années. Merci à toi, Joe, pour ces riches échanges et ta vieille et durable amitié. Tu nous manques beaucoup.

Préface

Je ne sais pas ce qui se passe ...



Je ne sais pas ce qui se passe,
Dit la Terre: j'ai mal au cœur.
Ai-je trop tourné dans l'espace
Ou bu trop d'amères liqueurs ?

Les boues rouges, les pluies acides,
Le vert-de-gris dans l'or du Rhin,
Les défoliants, les pesticides,
N'en voilà des poisons malins !

C'est si fort que j'en perds la boule,
J'en ai les Pôles de travers,
Ma tête à tant rouler se saoule:
Je vois l'Univers à l'envers !

Je songe à ma rondeur de pomme
Dans le commencement des temps,
Juste avant que la dent de l'homme
Ne vienne se planter dedans.

...



1 Introduction

"Celui qui sait ne parle pas, celui qui parle ne sait pas"

Instruits par cette redoutable maxime de Lao-Tseu, nous avons lâchement décidé ...

... d'écrire et de dessiner.

Il est reconnu par la communauté scientifique depuis plusieurs décennies que la cause du réchauffement est d'origine humaine, due depuis 150 ans à l'augmentation extrêmement rapide de la teneur de l'atmosphère en dioxyde de carbone, et à l'effet de serre croissant qui en découle.

Ce réchauffement dépasse à chaque échéance les estimations précédentes, mettant en défaut les méthodes courantes de prévision. Il est accompagné d'une série "d'évènements extrêmes" tels que canicules, inondations, sécheresses, tempêtes, etc., d'intensité et fréquence croissantes, dont l'origine est restée jusqu'à présent mal comprise. Jusqu'où ce diable de climat nous entraînera-t-il ?

Cet ouvrage, bien que destiné au plus grand nombre, se veut avant tout scientifique et rigoureux, tout en restant simple. Dans un souci de clarté et de démystification, nous avons remplacé le formalisme mathématique par des "expériences de coin de table" ou des schémas qui, malgré leur apparente simplicité, ne trahissent pas la rigueur de la démonstration. Dans le but de toucher un public le plus large possible, nous avons choisi le format de type « Récit Graphique », de façon à en alléger la lecture, sans oublier de l'agrémenter de quelques notes d'humour, autour de discussions entre un scientifique et divers personnages, comme l'Ours Polaire, le Manchot Adélie, la Mouette Rieuse, Lulu la Brebis, le Berger, et Toby le Chien.

Avec eux, nous analysons de façon simple et ludique où en est le climat, quel est son fonctionnement, et comment nous pouvons (ou pas) prévoir son évolution. Nous nous basons pour cela sur la **Théorie des Systèmes Dynamiques**, qui découle directement du chaos déterministe de Poincaré. Cette approche est connue depuis bien longtemps en Physique Théorique, et tout particulièrement en Physique des Transitions de Phase, mais est encore trop largement ignorée dans d'autres domaines, y compris en climatologie malgré plusieurs travaux très novateurs publiés depuis une dizaine d'années.

Nous montrerons très simplement sur cette base pourquoi la montée en puissance des évènements extrêmes n'est autre que le fameux « adoucissement critique », très sérieux signal d'alarme annonçant un basculement climatique imminent. C'est le **SAUT DANS L'INCONNU**.

Cela invalide les simulations numériques qui, aussi perfectionnées soient-elles, ne peuvent fonctionner à l'approche d'une telle singularité. C'est le talon d'Achille du numérique ! Les prévisions basées sur de telles simulations sont donc biaisées et hélas trop optimistes. Cela rebat sérieusement les cartes, alors que nous nous rapprochons dangereusement de cette échéance.

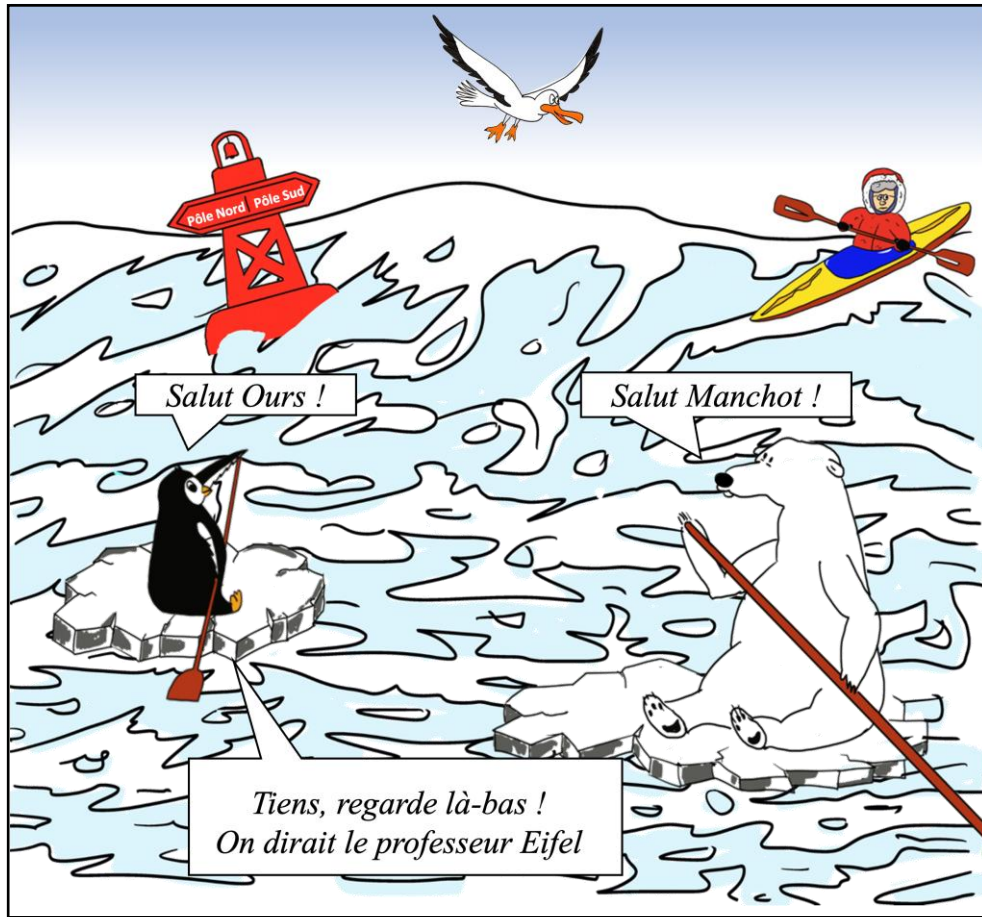
Le temps climatique est soudain devenu plus court que le temps politique, ce qui est un comble ! Cela bouscule nos bonnes vieilles habitudes, et invalide par avance toute décision politique ou technique qui n'aurait pas d'effet pratique d'ici à peine quelques années. Nous sommes en effet dans une URGENCE VITALE. Viser 2050 pour vraiment réduire la teneur de l'atmosphère en CO₂ est une aberration qui s'apparente à un suicide collectif, pour emprunter les termes d'Antonio Guterres, Secrétaire Général de l'ONU.

Simultanément, "au fil de l'intrigue", nous nous attacherons à détricoter certaines idées reçues, parfois tenaces, et qui tendent à être d'autant plus répandues qu'elles sont inexactes.

Pour ceux d'entre vous qui auraient la curiosité d'aller plus loin, ce que nous espérons, nous donnons en fin d'ouvrage (ce qui n'est pas courant dans une bande dessinée !) plus de 2 pages de références scientifiques, qui sont pour la plupart en libre accès sur Internet.

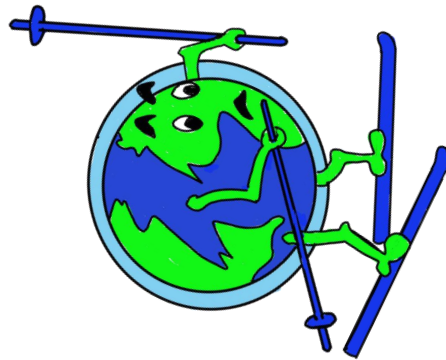
L'improbable rencontre de l'Ours polaire , du Manchot Adélie et du professeur Eiffel



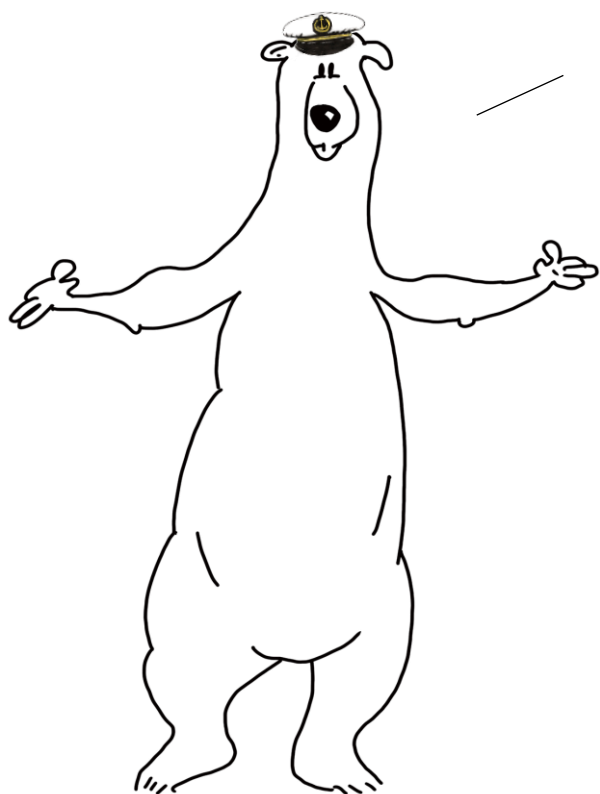


2

Où diable le changement climatique nous emmène-t-il ?



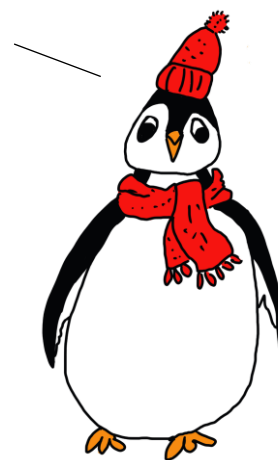
Il faut toujours dire ce que l'on voit .
Et surtout il faut toujours, ce qui est plus difficile,
voir ce que l'on voit.
(Charles Péguy)



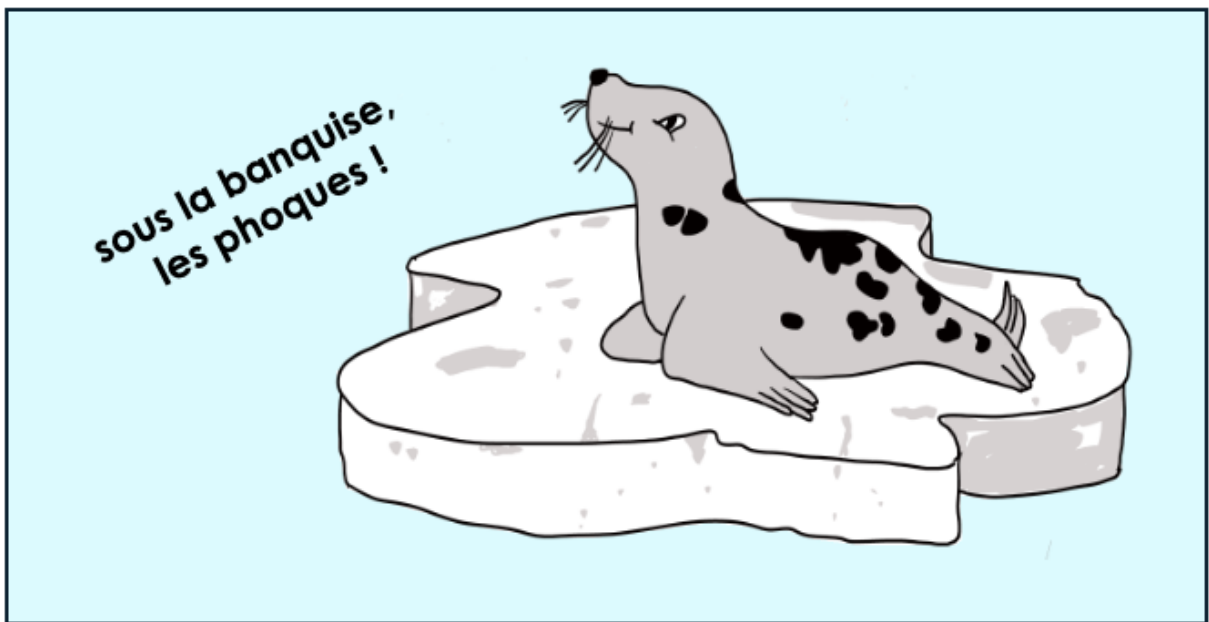
On n'a plus les hivers d'antan. Avant, on essayait de se réfugier au pôle Nord, car des experts nous avaient expliqué que c'était le seul endroit du monde où il n'y avait pas de vent du Nord. Mais il y faisait quand même sacrément froid.



Vous avez bien de la chance là-haut. Nous, en Antarctique, nous n'avons *que* du vent du Nord. C'est peut-être pour ça que le continent est si glacial ! D'ailleurs je pense que cette histoire de vent du Nord c'était une grosse blague. On a vu un jour débarquer ici un type sympa, un certain Mathieu, qui est allé voir ce qui se passait loin de la banquise, sur la calotte glaciaire, tout près du pôle Sud, où tout le monde croyait qu'il faisait un froid de phoque (Casado et al. 2023). Eh bien non ! Il a publié un article disant que ça se réchauffait terriblement vite, quasiment autant que sur la côte.



Pareil chez nous ! Maintenant on n'a même plus besoin d'y aller au pôle Nord, car tout s'est tellement réchauffé, même en hiver, qu'on essaye de profiter de la banquise tant qu'il y en a, et tant qu'il y a des phoques en dessous qui s'y cachent et qu'on peut attraper. C'est plus facile que les morse, qui vivent en groupe, et sont armés de dangereuses défenses.



C'est vrai. Pas drôle. On crève aussi de faim par ici. Nos petits n'ont pas le temps de grandir avant d'apprendre à nager, et les orques se régalent.

Oui, c'est bien inquiétant. En ce moment, des collègues scientifiques surveillent de près l'énorme glacier Thwaites, aussi grand que le Royaume Uni, qui se jette dans la mer d'Amundsen, à l'ouest de la péninsule Antarctique. Il se réchauffe tellement qu'il se "ramollit", comme du beurre, et s'écoule de plus en plus vite vers l'océan (Alley et al. 2021, Pettit et al., 2021, Wild C.T. et al., 2022).



Ah bon, je comprends. C'est pour ça que le front du glacier flotte maintenant sur l'océan, qu'il part en morceaux, qu'il y a de plus en plus d'icebergs en mer?

Oui, exactement. Certains s'imaginent que s'il y a plus d'icebergs c'est qu'il fait plus froid, mais c'est exactement le contraire !





Bizarre !
Non ?

Non, pas vraiment et c'est grave. Tant qu'elle est sur l'eau, cette glace flottante la refroidit en fondant comme un glaçon dans un verre, et se renouvelle par l'écoulement du glacier. Cette eau très froide est ensuite transportée par les courants sur tous les océans de la planète, ce qui les empêche de se réchauffer trop vite. C'est la même chose avec les glaciers du Groenland.



Mais un jour, à force de fondre, le front des glaciers se sera retiré sur la terre ferme. Tous ces glaciers, en Antarctique, Groenland, Andes de Patagonie, ... , ne déverseront plus de glace dans les océans, mais simplement de l'eau qui a déjà fondu sur terre, et qui est simplement fraîche. Et l'ensemble de la masse océanique se réchauffera alors beaucoup beaucoup plus vite, exactement comme dans un verre d'eau une fois que le dernier glaçon aura fondu !

Chez nous dans l'Arctique, est ce que ça risque aussi de réchauffer l'air ? On commence à crever de chaud par ici !

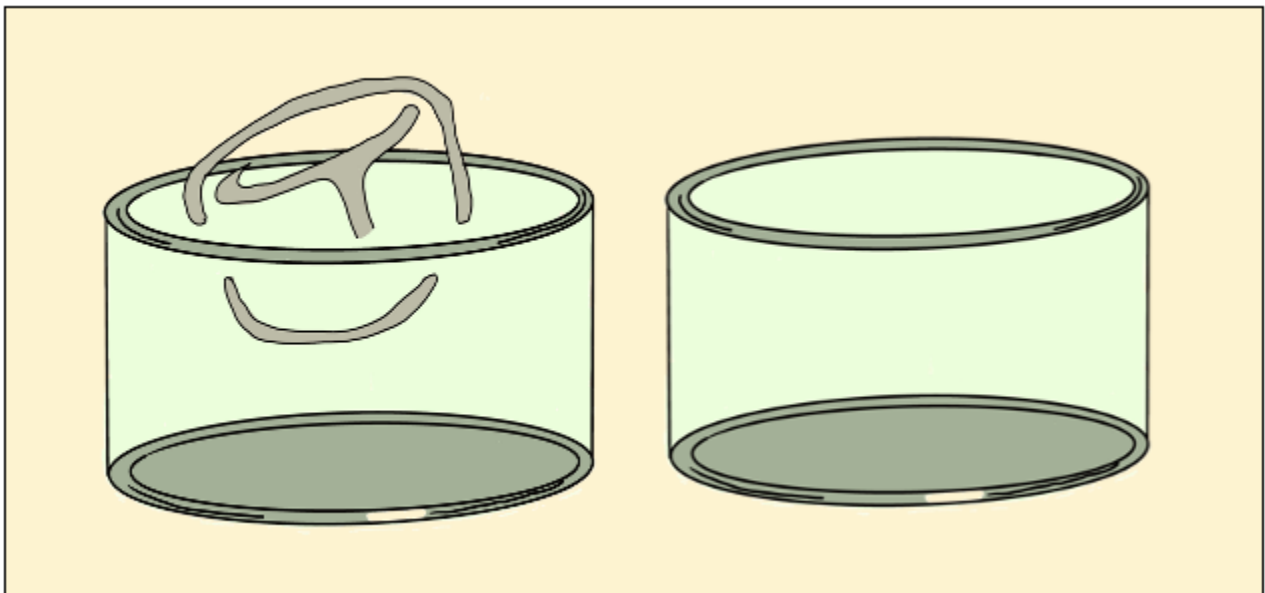


Oui, bien sûr. Sauf qu'en Arctique il s'agit surtout de la banquise, faite d'eau de mer gelée, qui flotte déjà sur l'océan. Elle est blanche comme neige, et renvoie vers le ciel la plus grande partie du rayonnement solaire qu'elle reçoit, comme la neige et la glace du continent Antarctique. Ça s'appelle l'albedo. Mais quand elle fond, elle est remplacée par de l'eau de mer beaucoup plus sombre, qui absorbe le rayonnement solaire et se réchauffe plus vite.

*Et ça ne risque pas de faire monter
le niveau des océans ?*



*Non, pas du tout dans ce cas. Ce que tu dis, Ours,
c'est vrai pour la fonte des glaciers qui reposent
sur terre, qui pourrait faire monter le niveau des
océans de quelques mètres ou même dizaines de
mètres sur l'ensemble du globe, noyer des côtes et
même des régions entières, mais pas pour la
banquise qui flotte sur l'eau.*



*Si tu veux t'en convaincre, prends un verre si tu
en trouves un dans une tanière de chercheurs du
Svalbard. Mets-y un glaçon, remplis le d'eau
jusqu'au bord, et laisse fondre le glaçon qui au
départ dépasse le niveau du verre. Tu verras que
pas une goutte d'eau ne débordera. C'est
Archimède qui a découvert ça en prenant son
bain à Syracuse il y a bien longtemps. Mais l'eau
n'était pas si froide, et le glaçon qui dépassait de
l'eau, c'était lui, qui tentait de tenir ce rôle !*





Oui, mais tout ça, le réchauffement, la fonte des glaces, la montée des océans, ça a bien dû arriver aussi sur Terre il y a longtemps, et même plusieurs fois, et ça s'est bien arrangé puisque nous sommes ici en train d'en discuter ?

Oui, évidemment, mais il y a très longtemps.

Il y a eu en effet des époques glaciaires, interglaciaires, et ainsi de suite, Mais à une époque où il n'y avait ni manchots, ni ours, ni humains.

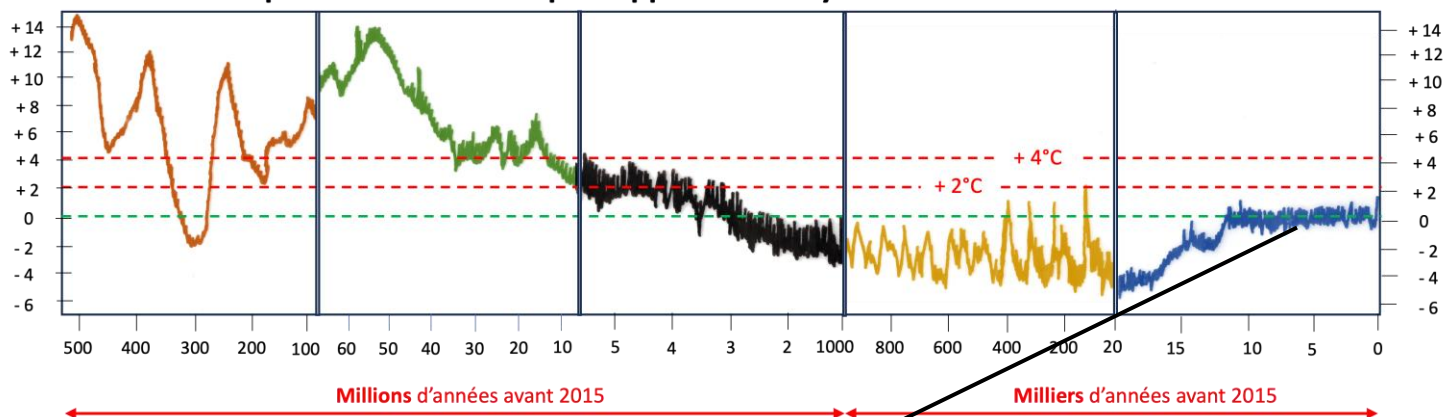


Intéressant! Mais si c'est déjà arrivé à une époque où il n'y avait pas d'humains, pourquoi entend-on dire que c'est vous les humains, qui êtes responsables du réchauffement ?



Oui, effectivement, c'est un argument qu'on entend parfois, et ça demande une petite explication. Faisons maintenant un peu d'histoire...

Température de la Terre par rapport à la moyenne des années 1960 - 1990



Réf. https://en.wikipedia.org/wiki/Geologic_temperature_record



La température de la Terre a toujours fluctué. Voici les variations de température sur des centaines de millions d'années par rapport à une référence qui est la température moyenne dans les années 1960 - 1990.

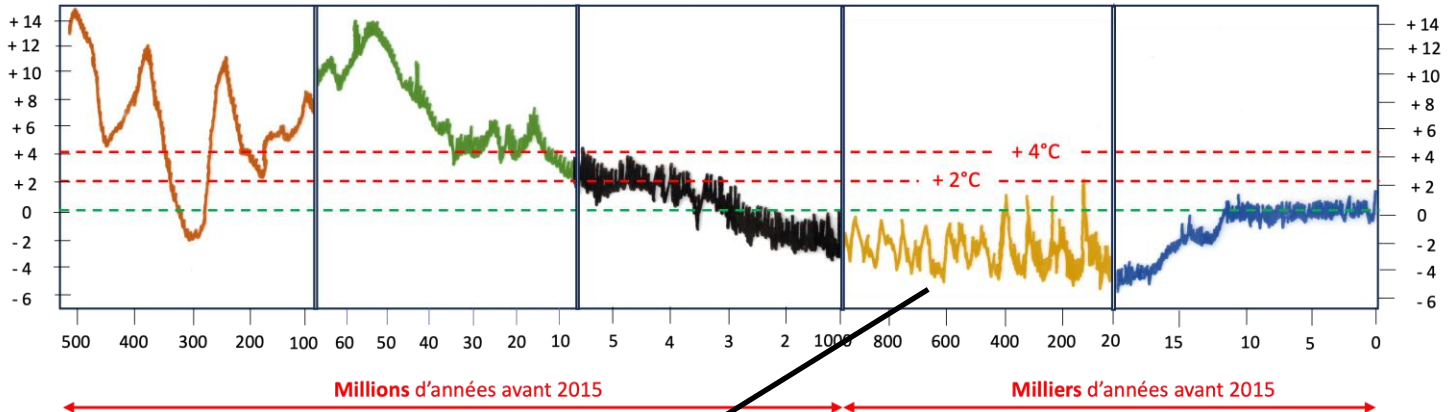
ATTENTION: l'échelle de temps n'est pas linéaire! Les trois premières cases sont graduées en millions d'années, et les deux suivantes en milliers d'années. Et dans ces deux zones, le passage d'une case à la suivante représente un grand coup de zoom.

On voit en bleu au bout de ma baguette que la température durant les derniers 10000 ou 12000 ans a été remarquablement constante, à 0.5 degrés près!

C'est cette stabilisation qui a permis à mes ancêtres humains de passer progressivement de l'état de chasseurs-cueilleurs à celui de cultivateurs sédentaires.

Mais si on zoomait encore davantage sur les toutes dernières années, on verrait (on le devine sur la figure) un emballement du réchauffement, qui nous a déjà emmenés à près de 2°C au-dessus de ce que nous avons connu au cours des derniers 10 000 ans, et qui n'est apparemment pas près de s'arrêter, comme nous le verrons plus loin.

Température de la Terre par rapport à la moyenne des années 1960 - 1990

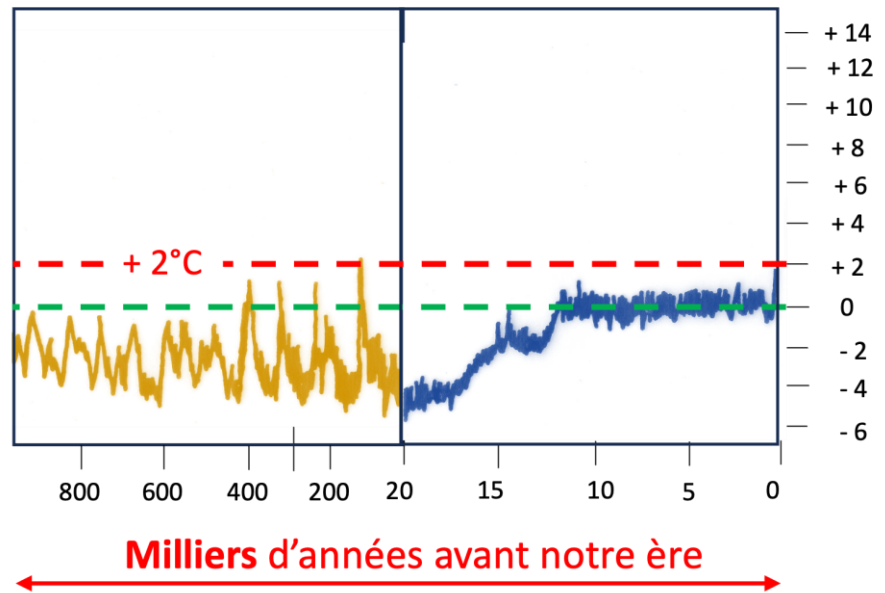


Maintenant, si on repart une case en arrière, on voit (courbe jaune) une succession de périodes glaciaires et interglaciaires, avec une périodicité de l'ordre de 100 000 ans, due principalement aux variations des paramètres orbitaux de la Terre autour du Soleil (distance Terre-Soleil en particulier).

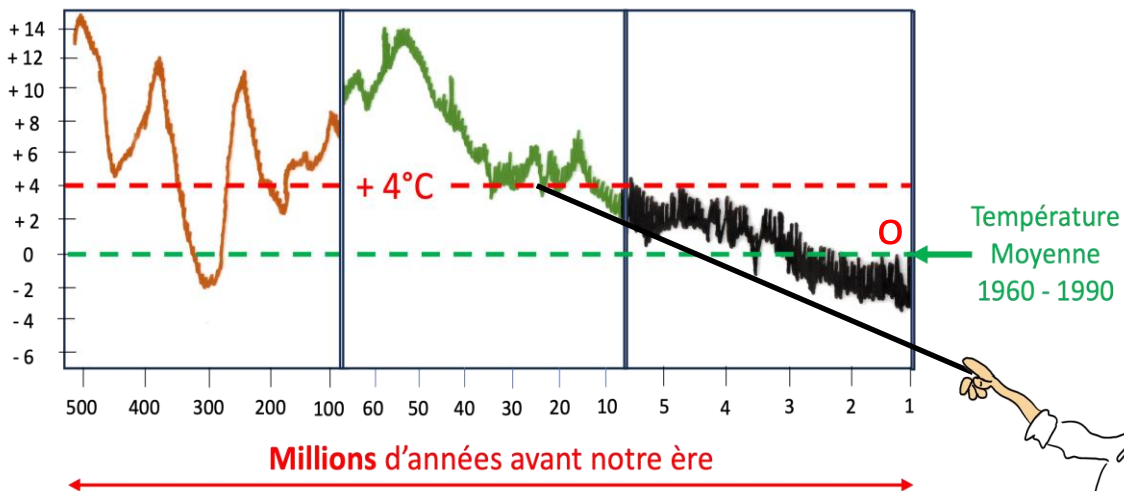
Mais à cause de l'effet de zoom, la durée du plateau bleu de la case de droite est probablement similaire à celle des sommets des pics jaunes de la case précédente

A part quelques « petits âges glaciaires » à l'échelle locale, se promenant de siècle en siècle sur différents continents, rien d'exceptionnel donc à l'échelle globale pour les 10 000 dernières années, qui étaient une période interglaciaire semblables aux précédentes. Si l'activité humaine ne s'était pas mêlée à cette histoire, les températures auraient dû « spontanément » redescendre (dans 50 000 ou 100 000 ans!).

Par contre, l'envolée actuelle des températures, qui se dirige vers les 3 ou 4°C dans les toutes prochaines années, est un réchauffement par rapport à une période déjà naturellement chaude! Elle n'a rien à voir avec les variations des paramètres orbitaux, contrairement à ce qu'on entend parfois affirmer, et en particulier par la soudaineté du réchauffement (150 ans au lieu d'environ 50 000 ans pour les réchauffements dans la période « jaune »).



On voit qu'il faut remonter à plus de 130 000 ans pour retrouver une température supérieure de 2°C à celle de notre référence préindustrielle.



Et il y a plus de 10 millions d'années que la Terre n'avait pas connu une température supérieure de 4°C à celle de cette référence



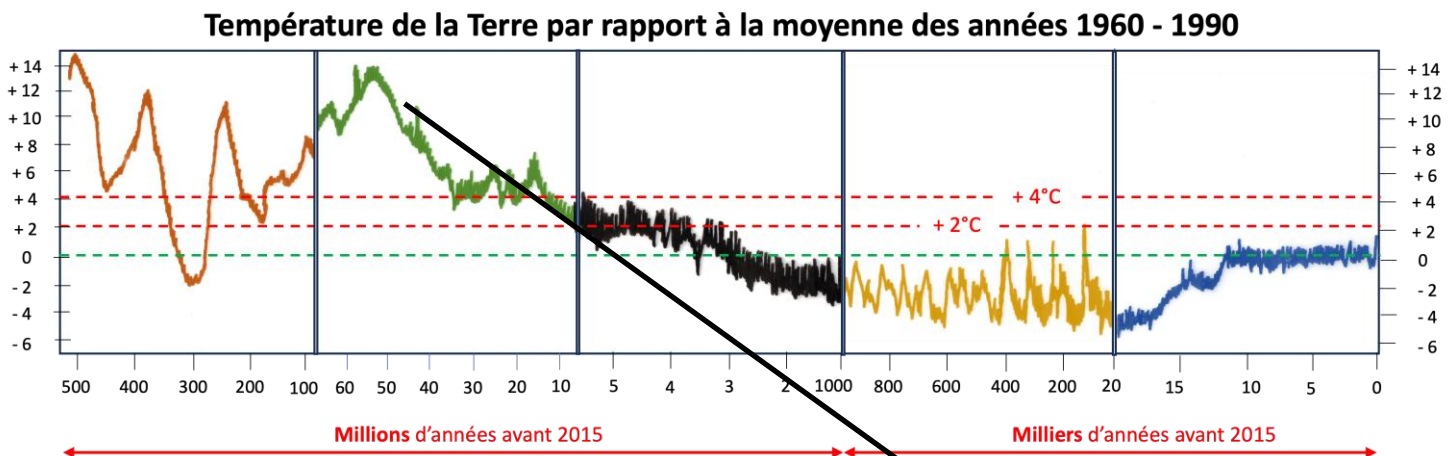


Ça répond à ta question, Manchot ?

Oui j'ai bien compris! , je suis peut être Manchot,
mais je ne suis ni sourd ni aveugle !



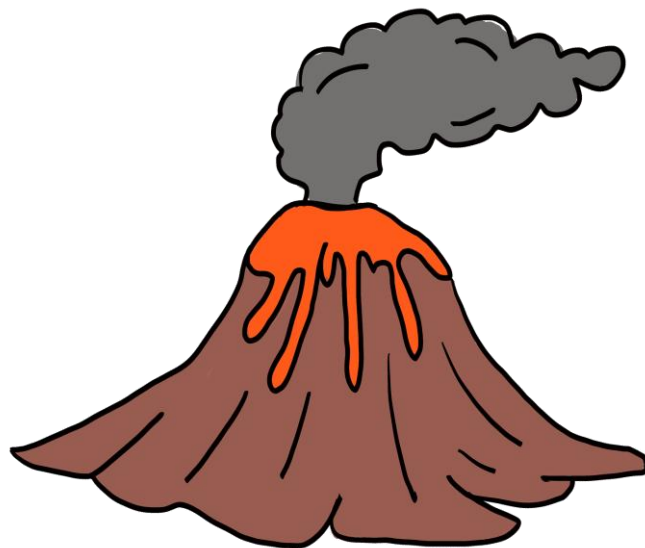
Bon, ne te fâche pas ! Allons plutôt voir ce qui s'est
passé dans des temps encore plus anciens, avec
quelques repères utiles, toujours sur cette même
courbe.



Là, sur la courbe verte, 10 millions d'années
après la disparition des dinosaures, il y a donc
56 millions d'années (j'ai bien dit "millions"
d'années!), on trouve des températures à plus de
10° au-dessus de notre référence préindustrielle
(courbe bleue).



C'est ce que l'on appelle le Maximum Thermique Paléocène-Eocène (Paléocene-Eocene Thermal Maximum ou PETM en anglais) (McInenney et al., 2011). Il a résulté d'une forte augmentation de la quantité de CO_2 , produite par une intense activité volcanique. Elle n'était pas très différente de celle d'aujourd'hui par la quantité de CO_2 émise. Mais cette émission de CO_2 s'était étalée sur plusieurs dizaines de milliers d'années, contre seulement 150 ans actuellement! Mais nous y reviendrons un peu plus loin!



Maintenant, pourquoi toutes ces variations? Pour comprendre, je crois que c'est le moment de prendre un peu de hauteur. Regardons notre Terre vue de l'espace.



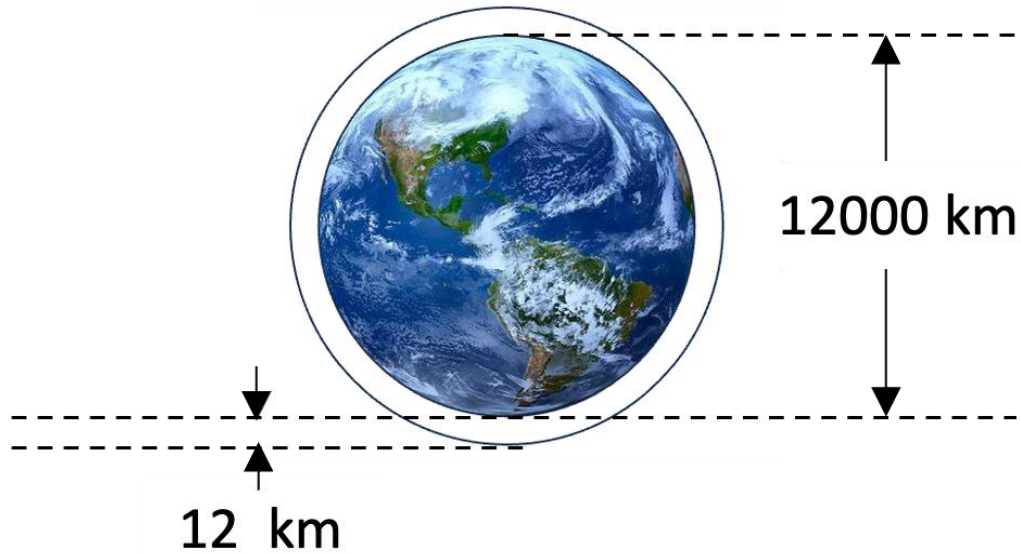
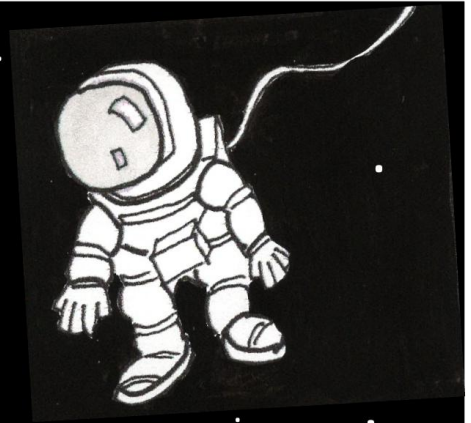
3

Comment fonctionne le climat



Le danger ce n'est pas ce que l'on ignore,
c'est ce que l'on tient pour certain et qui ne l'est pas
(Mark Twain)

Allo la Terre ... Bzzz ... l'épaisseur de l'atmosphère est de 12 kilomètres... Bzzz ... le diamètre est de 12000 kilomètres . Bzzzz ... Terminé ... Bzzzz .



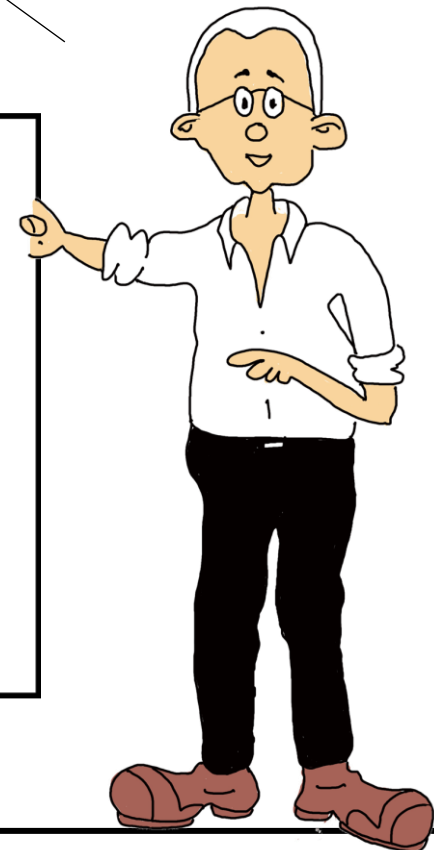
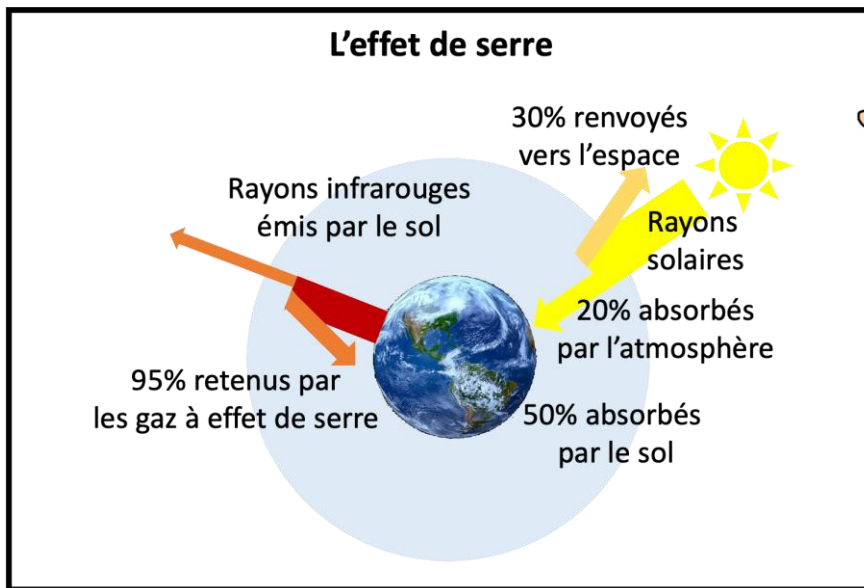
Imaginez un instant. Si la Terre faisait 1 m de diamètre, l'atmosphère aurait une épaisseur de seulement 1 mm. Ce n'est rien !

Et pourtant, c'est grâce à cette mince pellicule si fragile que nous sommes protégés des rayons cosmiques... et que nous respirons !

Et elle joue aussi un autre rôle essentiel,
dû à ce qu'on appelle L'EFFET DE SERRE.

C'est un phénomène naturel et une
condition indispensable au type de vie qui
s'est développé
sur terre. La terre reçoit toute son énergie
du soleil. Seule une partie de cette énergie
est absorbée par le sol et l'atmosphère. Le
reste est renvoyé dans l'espace. C'est encore
un phénomène d'albedo,
en grande partie dû aux nuages.

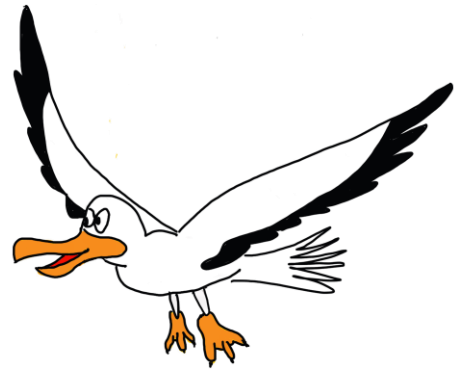
Mais en outre les gaz à effet
de serre empêchent une
bonne partie des rayons
infrarouges émis par la terre
elle-même du fait de sa
température (ça s'appelle la
loi de Stefan) d'être renvoyés
vers l'espace.



L'effet de serre sur Terre est dû à plusieurs gaz, essentiellement:

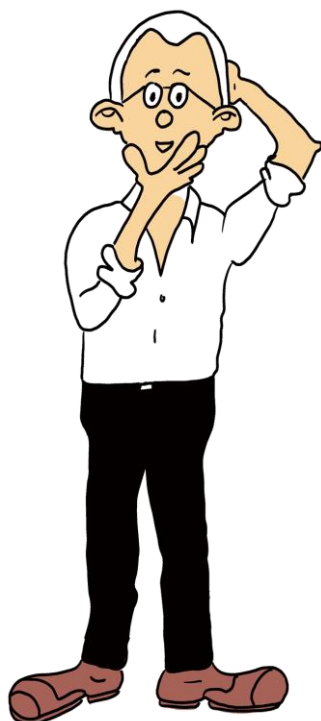
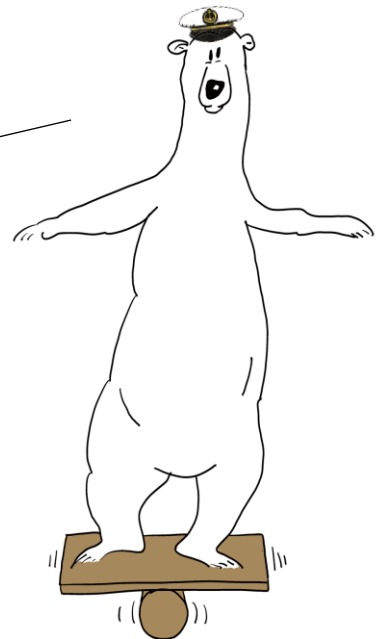
1. **Le dioxyde de carbone CO_2** , dont on entend beaucoup parler, qui est le principal responsable du réchauffement actuel.
2. **Le méthane CH_4** , environ 25 fois plus efficace en effet de serre que le CO_2 , mais qui est beaucoup moins abondant et disparaît rapidement.
3. **Les oxydes d'azote, les fameux NO_x** , mais qui eux aussi se dégradent relativement vite
4. Mais également, et ça se sait moins, la **vapeur d'eau** !

*La vapeur d'eau ?
Tu as bien dit la vapeur d'eau ???*



*Oui, je confirme. La vapeur d'eau est
un puissant gaz à effet de serre.
Sans elle, la Terre ne serait qu'un désert glacé, tout comme
Mars qui connaît des températures entre -150°C et $+35^{\circ}\text{C}$,
selon la saison, la latitude et l'heure de la "journée".
Mais si au contraire nous ne vivons pas ici dans une
fournaise, c'est que l'eau est présente sur Terre sous ses 3
états, solide, liquide et vapeur, qui sont en équilibre les
uns par rapport aux autres.*

*En équilibre ?
Qu'est-ce que tu veux dire ?*



*Ce que je veux dire c'est que l'atmosphère
est souvent saturée de vapeur d'eau,*

... et que tout supplément de vapeur d'eau injecté dans l'air par l'activité humaine (ou autrement) est automatiquement compensé par des précipitations (pluie ou neige), ce qui ramène le système à l'équilibre.

Il se régule tout seul !

Cela a été un facteur clé dans la sélection des variétés de types de vie qui ont pu se développer, muter et s'adapter les uns aux autres et avec les fluctuations du climat durant les millions d'années qui nous ont précédés, pour aboutir à ce que nous connaissons aujourd'hui.



*Et pour le CO₂,
ce n'est pas la même chose ???*

Non, pas du tout hélas!

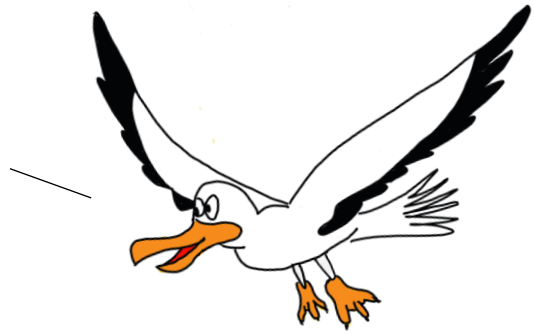
Parce qu'il n'existe naturellement sur Terre qu'à l'état gazeux. Nous n'avons aucune précipitation de CO₂, ni en pluie ni en neige carbonique, car il fait déjà trop chaud pour cela !

Il était à peu près régulé par la photosynthèse avant l'ère industrielle. Mais actuellement l'activité humaine produit du CO₂ à un tel rythme que la Nature n'a plus le temps de réagir.

Et donc la température s'envole.



Mais... si ça devient trop chaud, est ce qu'on ne pourrait pas s'envoler nous aussi, vers Mars par exemple, où il fait bien plus froid comme tu l'as dit ?

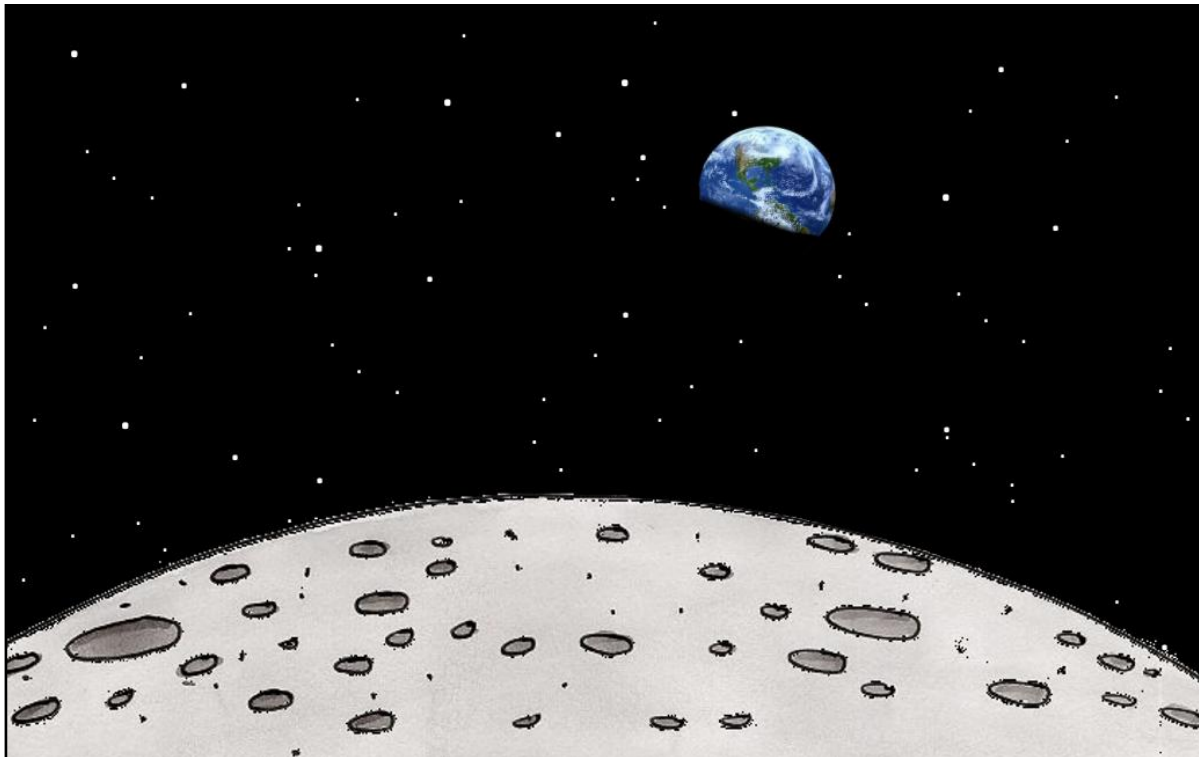


Oui, certains y ont pensé!

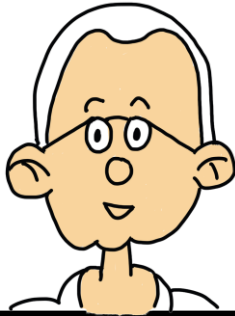
Mais c'est de la folie pure!

Même si la Terre devenait trop chaude pour nous, petits êtres fragiles, si dépendants de notre cher oxygène, le climat martien serait bien pire.

Aucun espoir d'y créer des températures « vivables » à cause de la quasi-absence de vapeur d'eau, ni d'y introduire ne serait-ce qu'un peu de cet oxygène, que la disparition du champ magnétique (il y a 4 milliards d'années), la faible gravité et le vent solaire auraient tôt fait d'expédier dans l'espace sans espoir de retour .

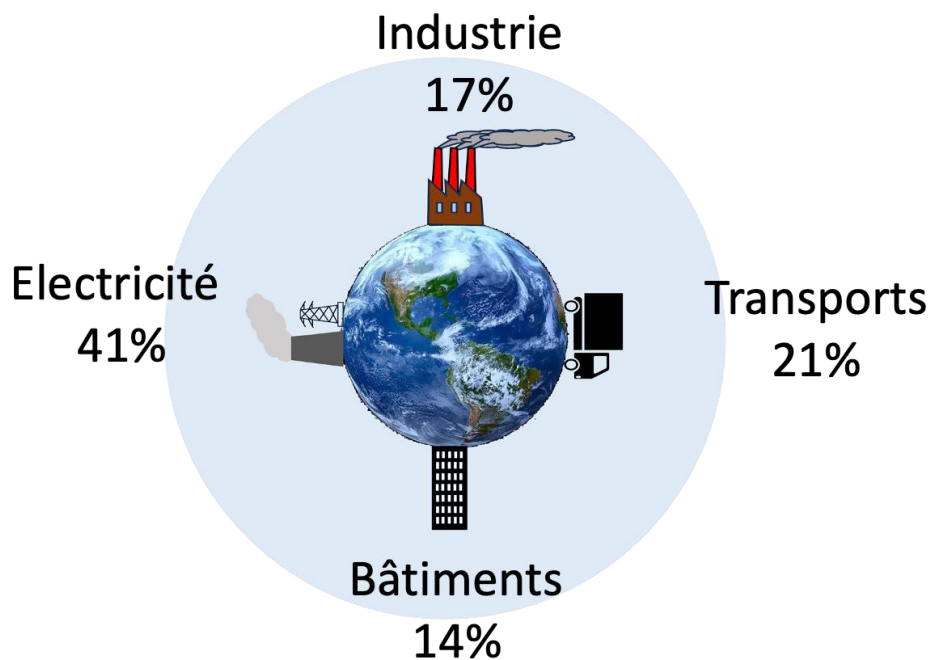


Mais alors, que faire ?

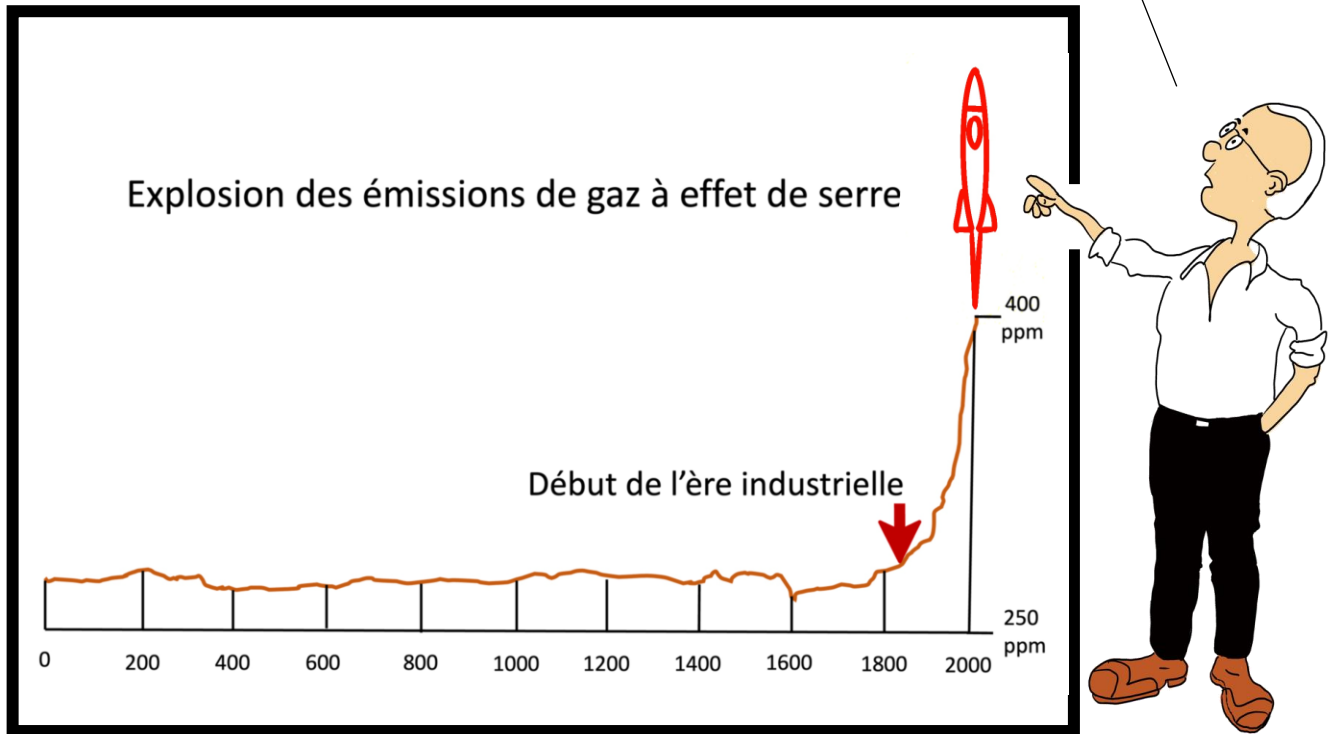


Le CO₂ que nous ajoutons provient essentiellement de la combustion des énergies fossiles et de la déforestation. Il est le principal incriminé dans l'augmentation de l'effet de serre. Et nous ne cessons d'en rajouter !!!

Emissions de CO₂ liées à la consommation d'énergies fossiles



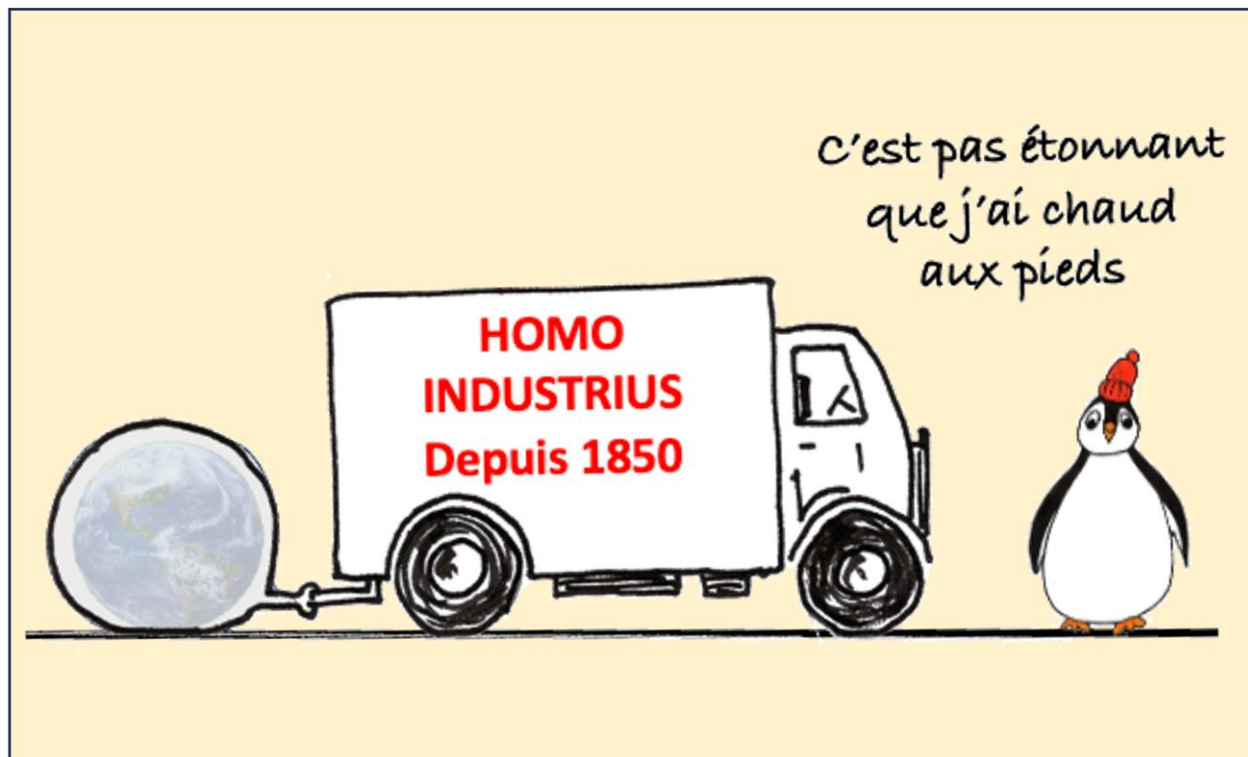
*Depuis le début de l'ère industrielle, ça a pratiquement doublé,
et le rythme s'accélère encore et encore !*



Teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre, en ppm (parties par million)

Sources: <https://www.youtube.com/watch?v=7vopu9X2mcc>

<https://nas-sites.org/americasclimatechoices/more-resources-on-climate-change>



4

Ce qui nous attend maintenant



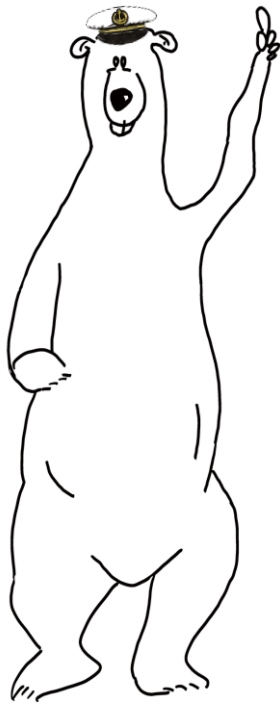
C'est parce que la Science n'est sûre de rien
qu'elle progresse sans cesse
(R. Massain, Physique et Physiciens)



4.1

Ça passe ou ça casse?

Les faux espoirs sont plus dangereux que les craintes
(John R.R. Tolkien)

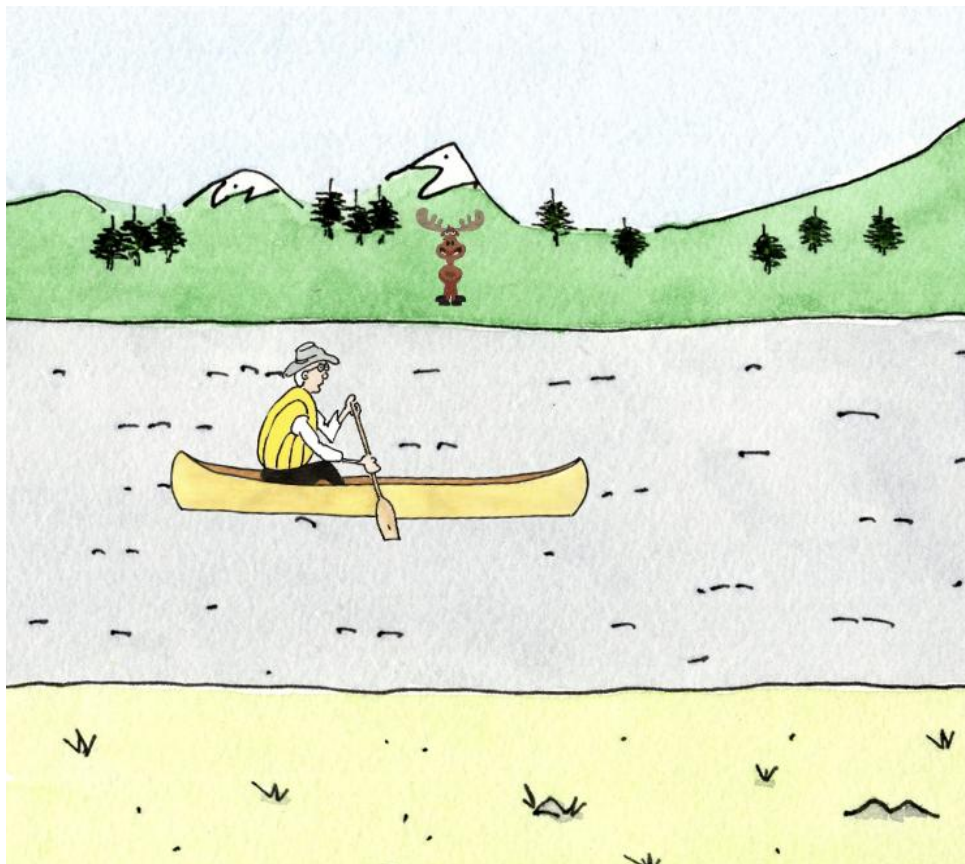


*Pas très encourageant tout ça!
Mais on pourra bien revenir en arrière si
on veut, non ?*

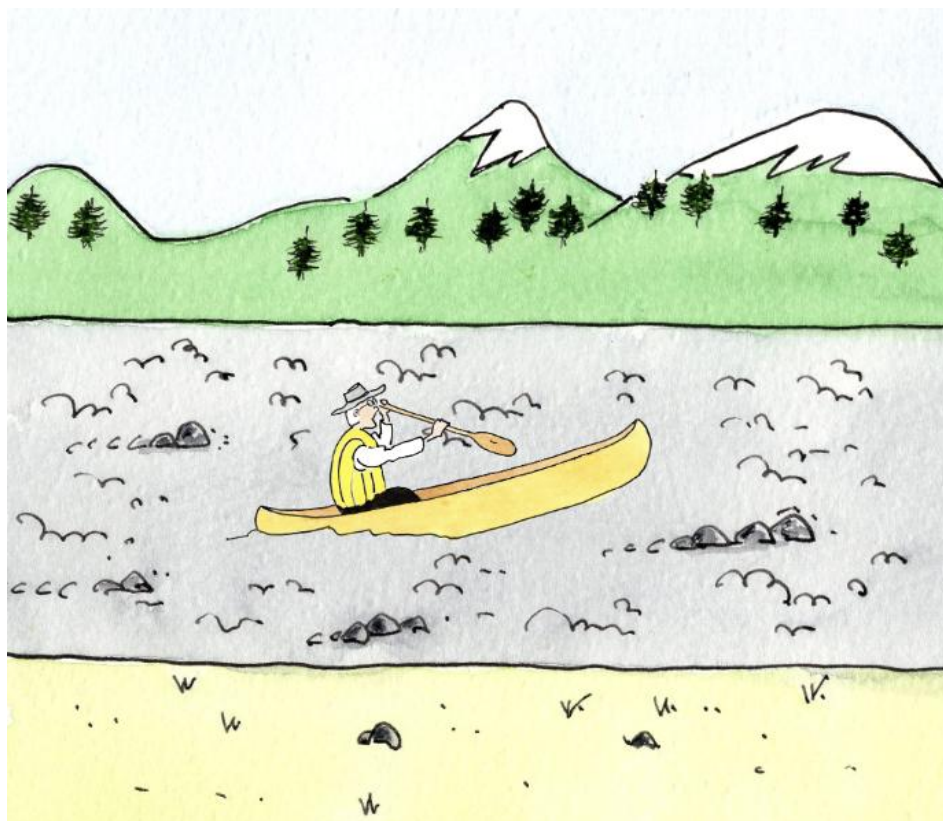
*Pas sûr du tout ! Le Labrador,
Ours, tu connais, je suppose ?
Allons y faire un tour en canoë,
sur la rivière Churchill.*



Elle est bien tranquille et bien sympa cette rivière !

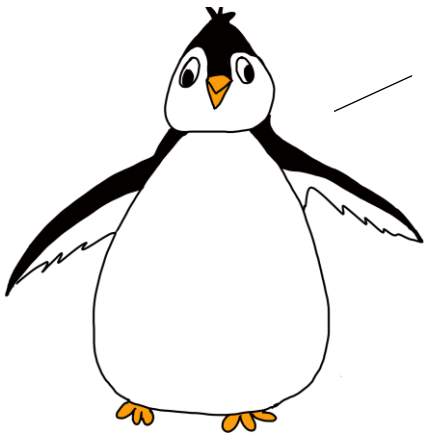


Là, ça commence à brasser pas mal. Si ça continue,
je ne vais pas tarder à embarquer de la flotte dans le canoë.
Mais bon, pas grave, j'écoperai !



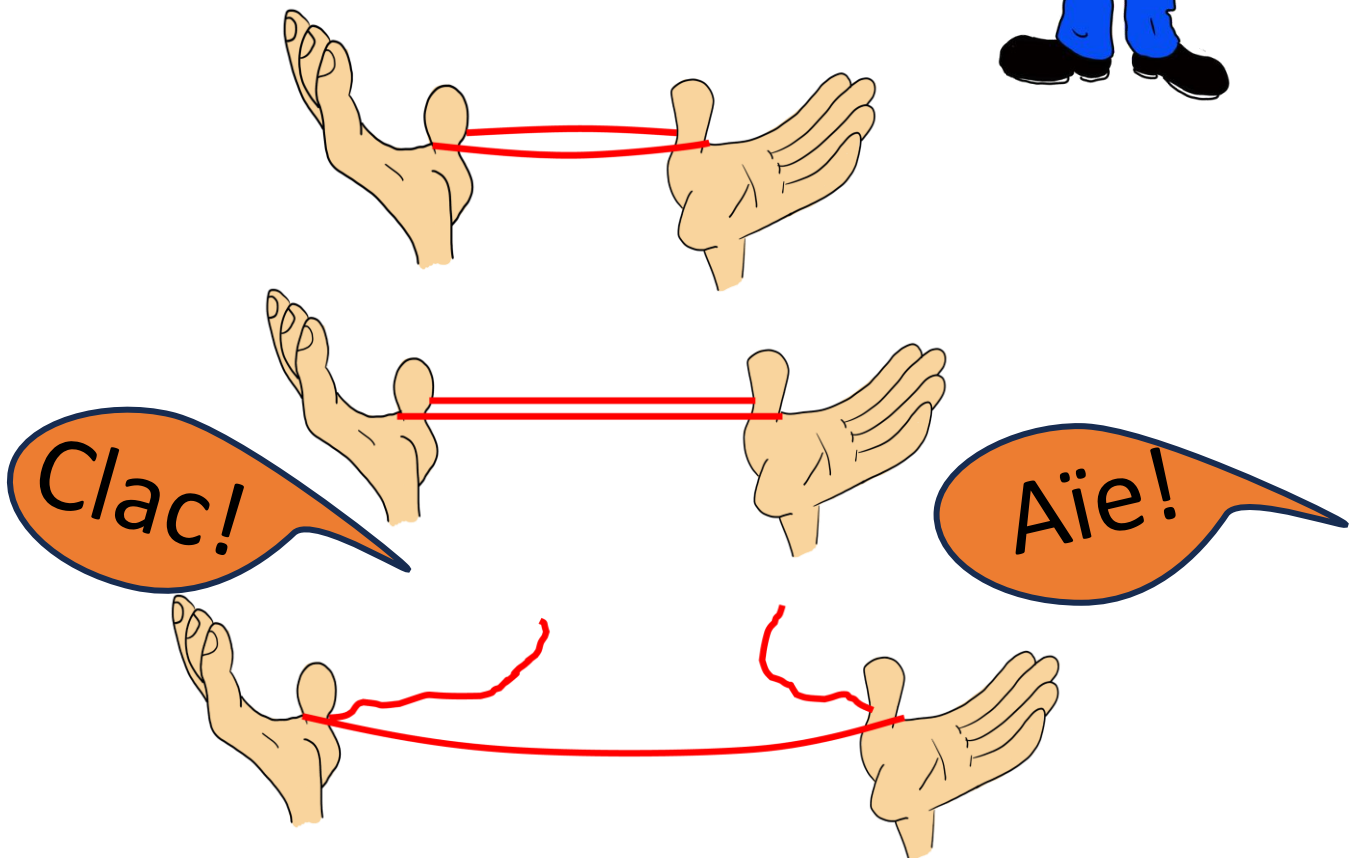
Horreur! Au secours! Personne ne m'a prévenu !!!





Ouais, moi, j'aime bien sauter dans l'eau.
Pas peur de l'eau froide! Mais là, Brrr !!! Je
ne sais pas voler, moi!!! Comment savoir si
on approche d'une chute ?

C'est la bonne question. Si tu tires sur
un élastique, il s'allonge. Tu tires de
plus en plus fort, et il s'allonge de plus
en plus. Mais si tu continues, d'un coup,
il se casse !



Et il y a des signes avant-coureurs. comme nous allons le voir maintenant.

Essayons de déchirer ce bout de toile de jute.

Je commence à tirer verticalement. Une fibre casse, ce qui agrandit un tout petit peu la taille de la déchirure.

Je tire de plus en plus fort, ce qui casse 3 autres fibres, puis 10, puis 30, comme autant de cascades de dominos qui s'enchainent, et agrandit de plus en plus rapidement la déchirure.

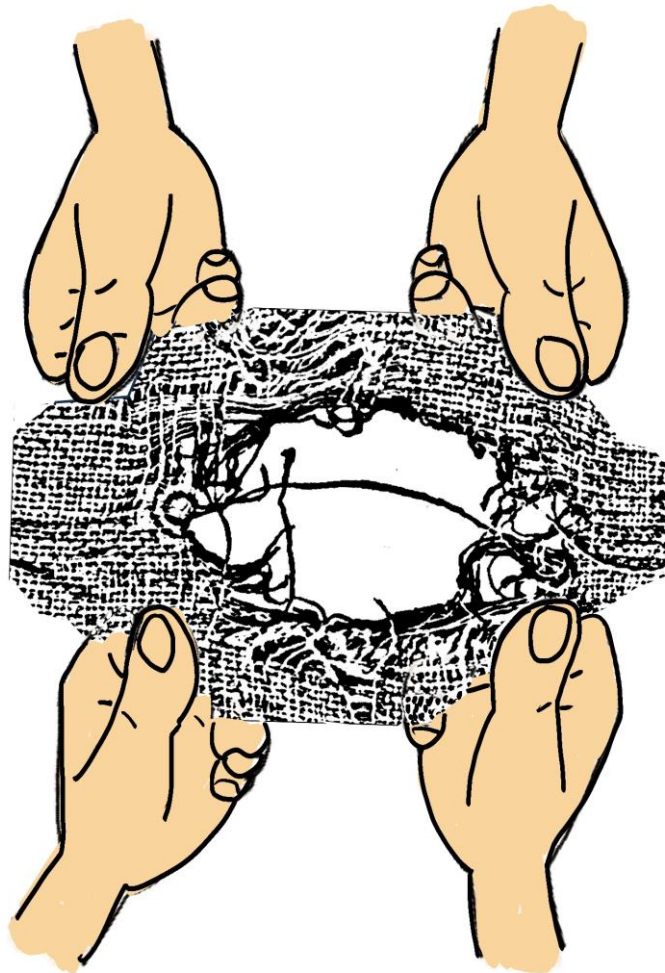
Et ainsi de suite, jusqu'au moment où

TOUT SE DÉCHIRE D'UN COUP.

Le canoë est passé de la rivière calme aux rapides turbulents, et d'un coup à la CHUTE FINALE !

La Nature a donc la délicatesse de nous prévenir !

Encore faut-il avoir la sagesse de l'écouter !





4.2

Ce que prévoit la science et ce que nous dit la nature

Ce n'est pas le doute qui rend fou, c'est la certitude
(Nietzsche).

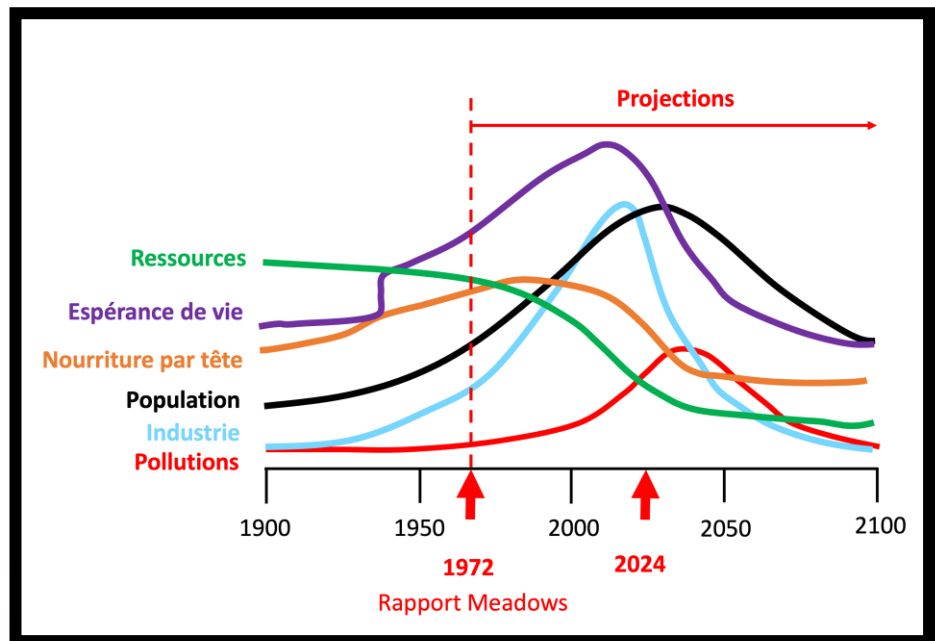
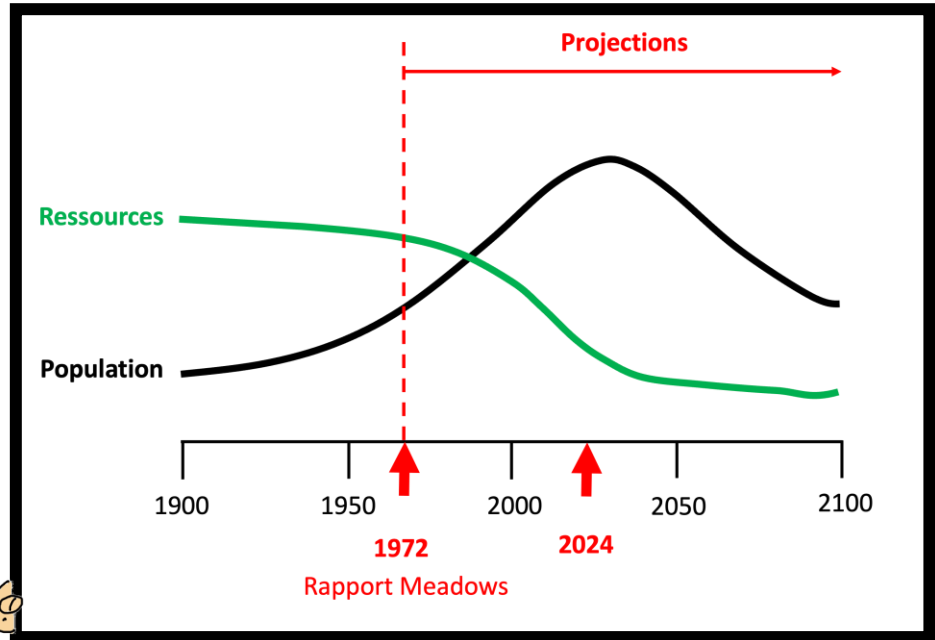


Tu parlais de la chute finale, Eiffel ! Peut-on prévoir le jour et l'heure ??? A-t-on déjà essayé ?

Oui, il y a une cinquantaine d'années déjà ! On ne peut pas dire qu'on n'était pas au courant ! Commençons donc par les précurseurs: Dennis et Donella Meadows, Jorgen Randers et William Behrens, dans le rapport publié par le MIT (Massachusetts Institute of Technology) à la demande du Club de Rome (1972). On peut aussi citer l'agronome René Dumont qui, se basant sur ces travaux, alertait en 1974 sur le risque d'un effondrement total de notre civilisation au cours du XXI^e siècle (Dumont R., 1974).

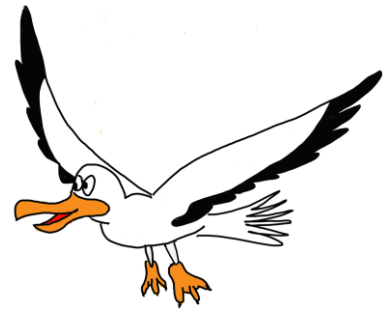
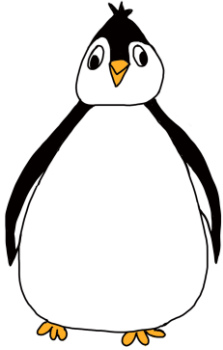


En 1972 en effet le rapport Meadows montrait que les ressources diminuaient (en vert) et que la population augmentait (en noir). Mauvais signe !!!



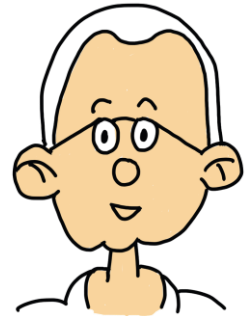
Et forcément, la nourriture par tête, puis l'espérance de vie et l'activité industrielle devaient passer par un maximum (estimé autour de 2024 à l'époque!!!), puis décroître. C'étaient leurs prévisions.

En 2024 ! Pas mal vu! J'ai entendu dire
que tout ça avait hélas déjà bien
commencé dans certains endroits de la
planète. Impressionnant !



Oui ! Le rapport Meadows a fait très fort pour l'époque!
Et maintenant, où en est-on ???
A-t-on progressé dans les techniques de prévision ?

Pablo Servigne et Raphaël Stevens avaient déjà parlé
d'effondrement dans leur « petit manuel de collapsologie »
(Servigne & Stevens 2015). Ils nous y expliquaient que les
différentes crises déjà vécues par l'humanité (disparition
« inexplicables de certaines civilisations ») pourraient
annoncer un effondrement (ou collapse) de notre
civilisation industrielle, qui cette fois serait global, à
l'échelle planétaire.



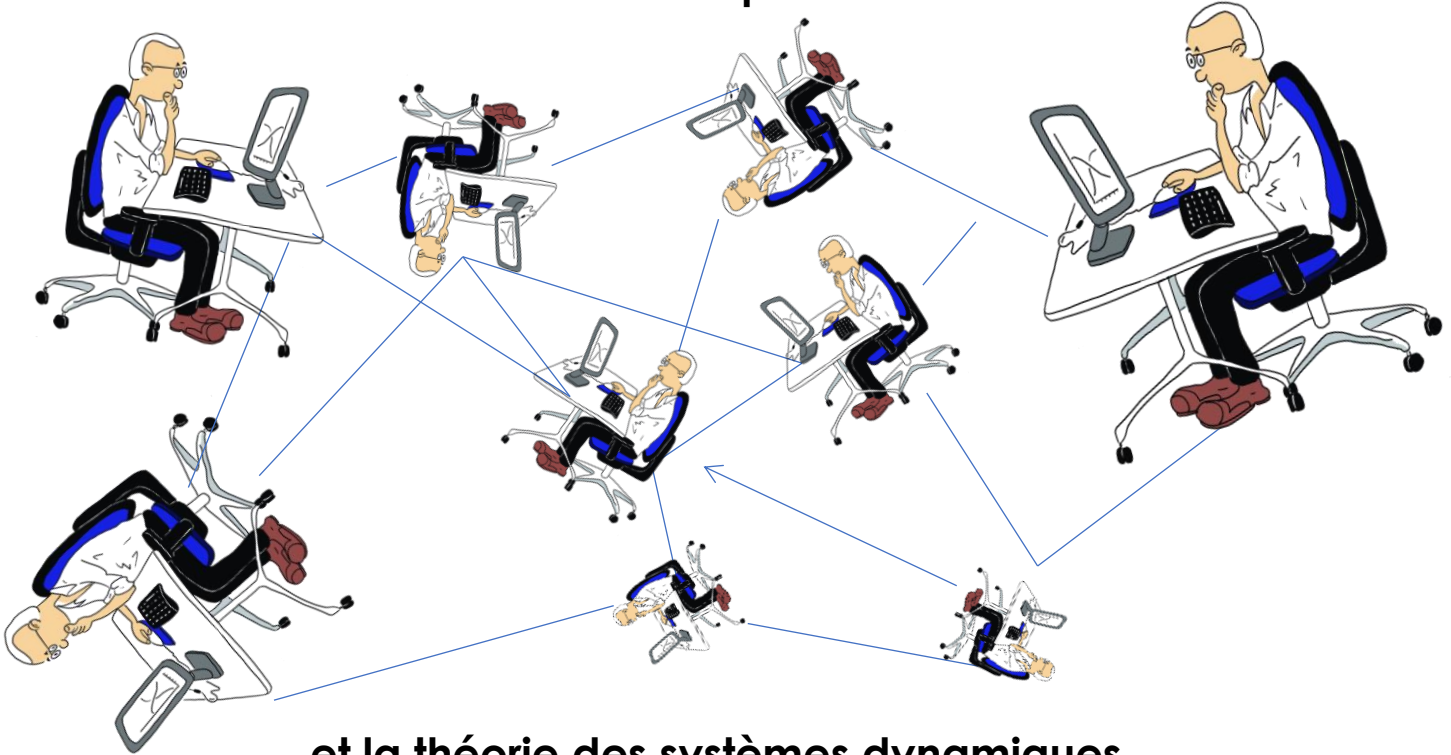
Quant aux techniques de prévision, oui, elles ont progressé sur deux points.
D'abord la puissance de calcul phénoménale dont nous disposons en ce
début de 21^e siècle et ensuite l'application des outils analytiques de
physique théorique issues des fameux travaux d'Henri Poincaré sur la
Théorie du Chaos Déterministe à la fin du 19^e siècle (Poincaré 1890, Holmes
1990), et développées au cours du 20^e siècle.



Henri Poincaré (1854 – 1912)
Mathématicien, physicien théoricien et philosophe des sciences Français

Il y a donc deux méthodes principales de prévision :

les simulations numériques "massives" ...



... et la théorie des systèmes dynamiques

« exposant critique » $p < 0$

$$V(t) = V_o + a(t_c - t)^p$$

temps

date du basculement

Oh tu sais, moi...les équations...!

Ce type d'équation décrit parfaitement les variations d'amplitude des vagues de chaleur, de sécheresse, de tempêtes, ainsi que celles de bien d'autres fluctuations critiques, comprenant probablement aussi les coups de folie humaine!

Comme on dit en maths, ça diverge quand on arrive au basculement !



4.2.1 Simulations Numériques

C'est le propre d'un esprit instruit de se satisfaire du degré de précision que permet la nature du sujet, et de ne pas chercher une plus grande exactitude là où seule une approximation de la vérité est possible.
(Aristote)

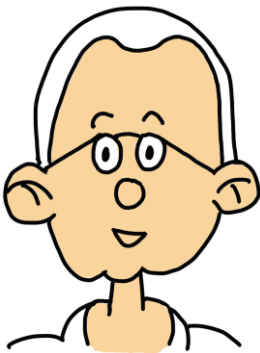
Regardons ça maintenant en détail en commençant par les simulations.

On divise le "système océans-atmosphère" en un grand nombre de cases tout comme les pixels d'un appareil photo.

On affecte à chacune de ces cellules des conditions initiales de température, pression, humidité, vitesse du vent, ... et l'âge du capitaine !

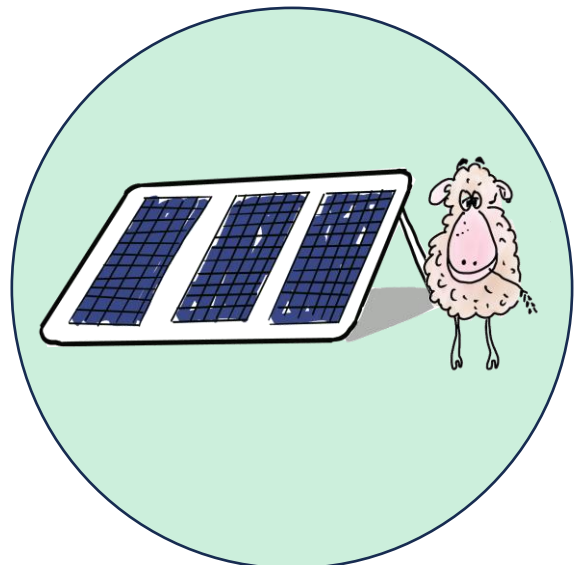
Et on demande à ces cellules d'échanger ces informations entre elles et d'y réagir en modifiant leur propre état, grâce aux lois de la Physique.





Certaines de ces données incluent différents scénarii possibles d'émission de gaz à effet de serre ou de décisions (ou indecisions) politiques ou économiques, ce qui donne différentes tendances prévisionnelles selon le scénario choisi.

Et on lance le calcul !



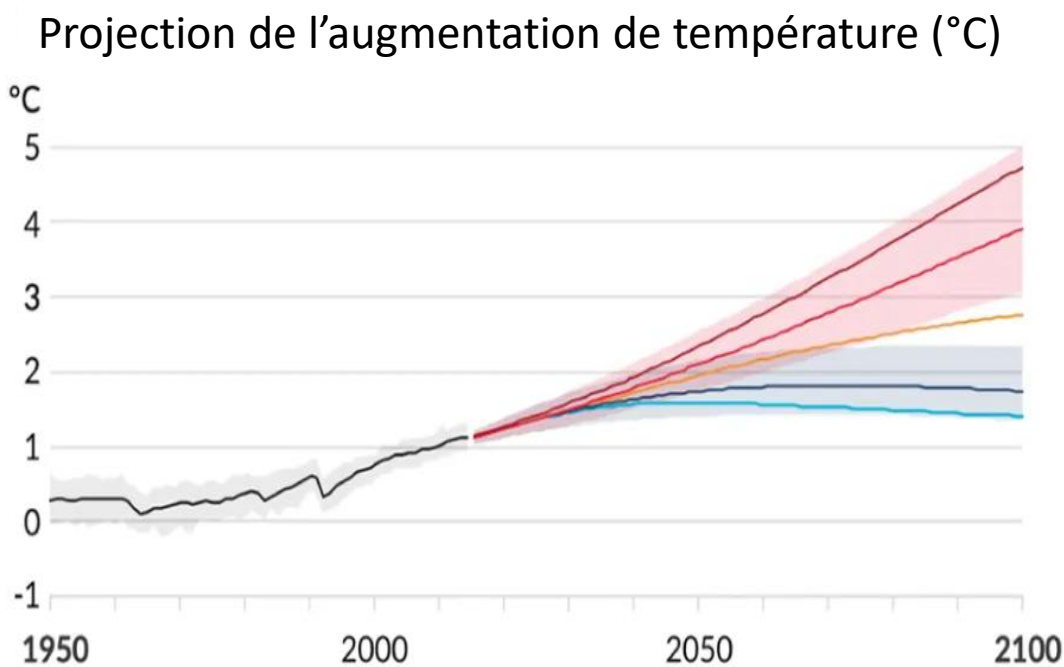
On peut consulter ces résultats en allant sur le site du GIEC (IPCC en anglais, pour Intergovernmental Panel on Climate Change)

En voici un exemple pour différents scénarii d'injection de gaz à effet de serre dans l'atmosphère

On constate que dans **TOUTES** les simulations, l'accroissement de la température de la surface de la Terre est **CONTINU** (pas de saut brutal), du scénario le plus optimiste (en bas) au plus pessimiste (en haut).



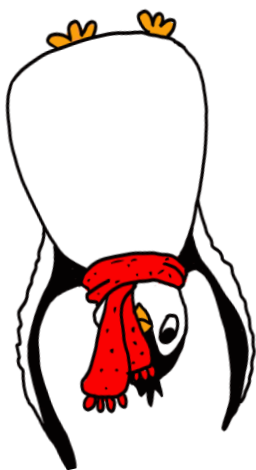
Exemple typique de résultats des différents scénarii d'injection de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.



cinq scénarios de combustion de combustibles fossiles

- | | |
|--|---|
| Highest CO ₂ amounts | Smaller CO ₂ amounts, then no increase in CO ₂ late in the 21st century |
| Medium to high CO ₂ amounts | No increase in CO ₂ beginning in 2050 |
| Medium CO ₂ amounts | |

Réchauffement de la surface de la Terre (°C)



*Quelle machinerie! C'est renversant!
Mais j'ai entendu dire que souvent ces
prévisions devaient être revues à la hausse.
Comment est-ce possible ?*

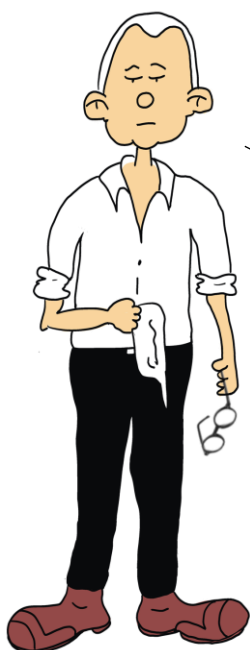


*Bizarrement, oui, c'est toujours à la hausse ! Ce qui a
conduit certaines équipes à postuler une supposée évolution
de la « sensibilité du climat » à un ajout de CO_2
(Sherwood et al., 2020, Saint-Martin et al, 2021) pour « expliquer »
ces ajustements des prévisions à la hausse.*



Mais il ne s'agit évidemment là que d'un bricolage qui n'explique rien.

*Mais est-ce vraiment continu? Et la grande
déchirure de la toile de jute, ou la cataracte
de la rivière Churchill, peut-on être sûrs qu'on
y échappera ?*



*Pas évident !
Pour y voir plus clair,
revenons à nos moutons !*





4.2.2

Points de bascule et signaux annonciateurs

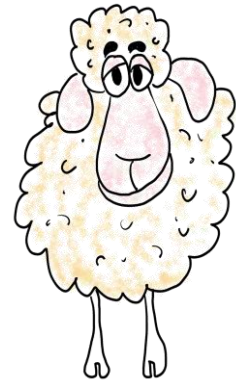
"C'est une triste chose de constater que la nature parle
et que le genre humain ne l'écoute pas"
(Victor Hugo)

Qui cueille une fleur dérange une étoile
(Théodore Monod)

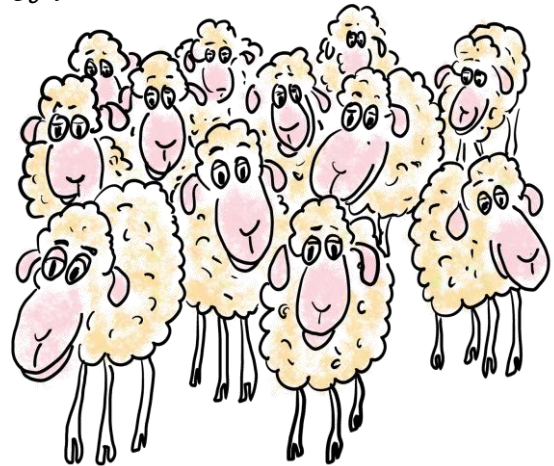
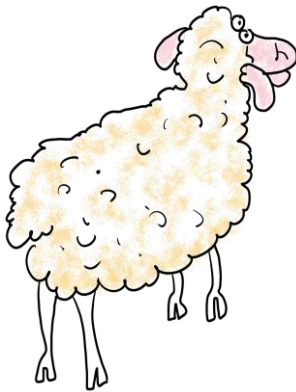
*Je suis un être simple, le chien
me l'a dit !*

*Mais le berger m'a dit aussi que quand nous
étions rassemblés en troupeau nous devenions
très difficiles à gérer.*

*Tout seul je suis simple.
Ensemble nous sommes complexes !*



L'extrapolation du comportement
d'un mouton isolé ...



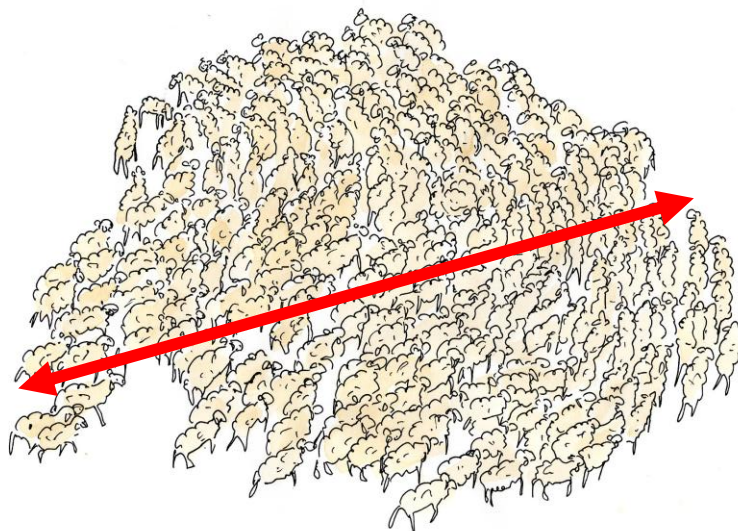
... ne permet pas de prédire le
comportement du troupeau.

Comme disent les physiciens, il peut y avoir émergence d'un
comportement macroscopique global, absent à l'échelle des
éléments individuels

Les physiciens (encore eux) appellent cela un système complexe.
Il est constitué d'un grand nombre d'éléments en forte interaction,
comme un troupeau de moutons qu'on a rassemblé.



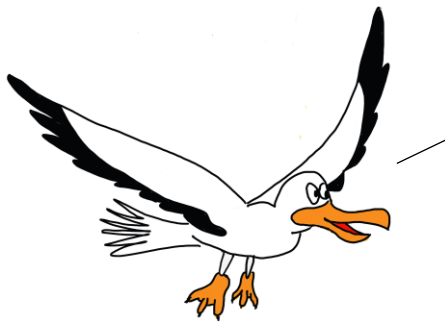
Waou !
Waou !



Quand le troupeau est dispersé, le comportement d'un mouton n'affecte que ses tout proches voisins, dans un "rayon" de quelques mètres, qu'on appelle la « longueur de corrélation ».

Mais à mesure que le chien rassemble le troupeau, les moutons se bousculent plus facilement, et la longueur de corrélation augmente. Il arrive un moment où elle atteint la taille du troupeau (en rouge sur la figure).

A ce stade le comportement d'un seul mouton peut affecter la totalité du troupeau.



*C'est ça qu'on appelle
le point critique ?*

Oui, exactement.

*C'est là que peut se produire un
basculement, comme par exemple lorsqu'un
des moutons décide « par hasard » de
sauter une falaise, entraînant avec lui
l'ensemble du troupeau.*



*Alors moi, je passe mon temps à fabriquer
des points critiques sans le savoir ???*

Où Toby, bien sûr, et c'est ton boulot!
 Je ne te reproche rien!
 Je ne peux pas laisser le troupeau se disperser,
 le loup serait trop content.
 Si le troupeau saute la falaise, ce n'est pas de ta faute,
 mais plutôt celle du papillon.

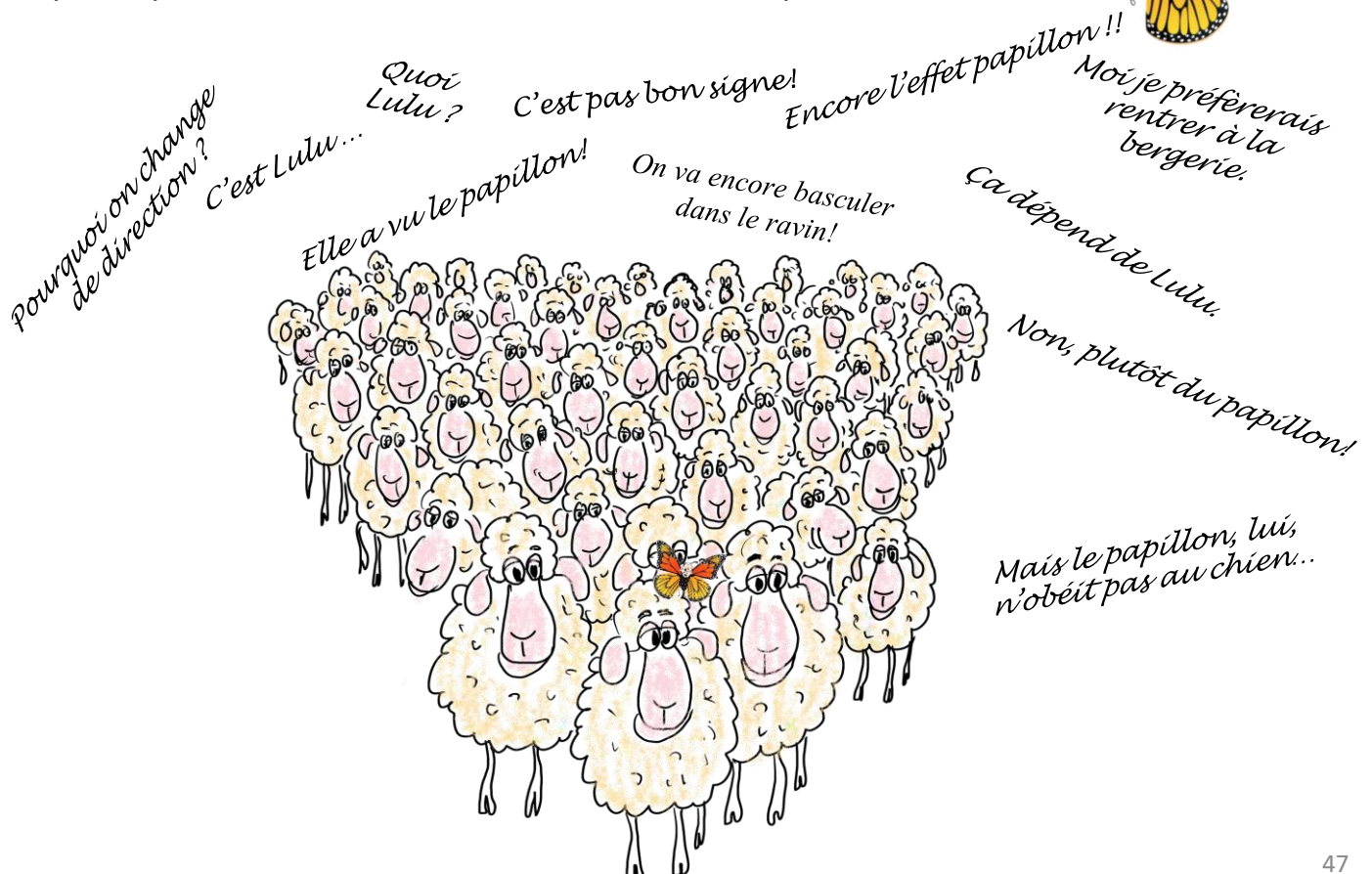


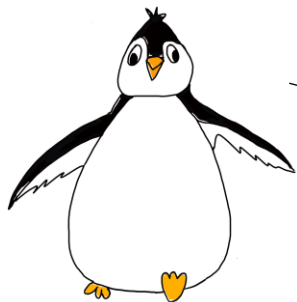
Du papillon ? Quel papillon ?

Supposons qu'un papillon vienne se poser délicatement sur le museau d'une brebis. Cette brebis, qui était sur le point de bousculer sa voisine de droite, va sursauter et bousculer celle de gauche. Ce qui changera complètement la forme et l'extension de la cascade de bousculades qui s'en suivra. Au lieu de sauter la falaise, le troupeau pourra éventuellement se retrouver en train de prendre le chemin de la bergerie... ou l'inverse!



Ou encore (mais c'est moins probable)
 provoquer une tornade de l'autre côté de la planète.



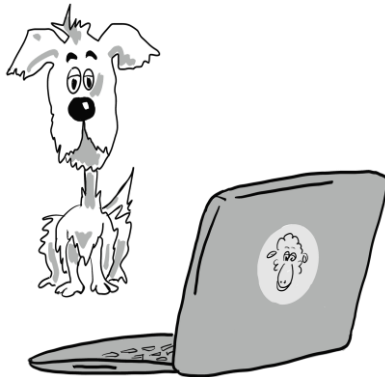
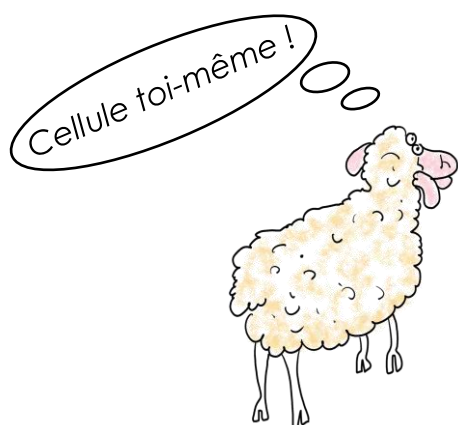


*Si le berger ne peut plus gérer le troupeau de moutons
bien rassemblé est-ce que son ordinateur
serait capable d'en venir à bout ?
Et qu'en est-il des gestionnaires
du parc d'ordinateurs simulant le climat ?*

Bonne question !

*Tout comme les cellules du calcul numérique, les
moutons interagissent entre eux.*

*Si le troupeau n'était pas trop grand, l'ordinateur
du berger pourrait calculer facilement toutes les
cascades d'évènements possibles dues aux
interactions entre moutons.*



Mais comparé à un troupeau de moutons, le nombre de cellules impliquées dans les calculs climatiques est énorme.

Et, bien pire encore. le nombre d'interactions entre toutes ces cellules devient absolument gigantesque, surtout près du point critique où chaque mouton peut déclencher des séries d'évènements à l'échelle du troupeau entier.

Le réseau d'ordinateurs peut alors saturer et se bloquer.

Dans ce genre de situations, les informaticiens ont l'habitude d'utiliser des "procédures de simplification".

Par exemple, , on peut décider de diviser un troupeau de 100 moutons en 10 groupes de 10 moutons, qu'on appellera "super moutons", et d'affecter à chacun de ces super moutons les propriétés moyennes des moutons qui le constituent.

On voit que le nombre d'interactions entre ces super moutons sera de très loin inférieur à ce qu'il était dans le troupeau de vrais moutons.

Le même raisonnement montre que la canicule, en regroupant les baigneurs sous les parasols, permet de simuler plus facilement leur comportement sur la plage, car il est plus facile de gérer les interactions entre un petit nombre de parasols qu'entre un grand nombre de baigneurs individuels



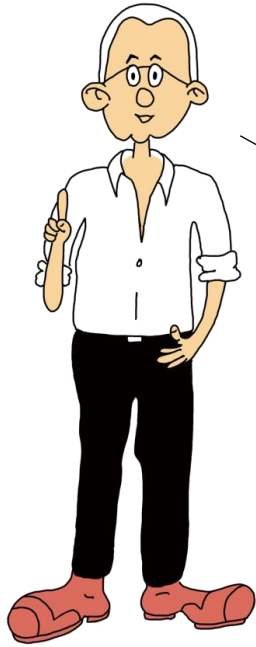
Et le calcul pourra repartir !

*Le calcul pourra repartir ???
Oh! Jolie cabriole il me semble !*

*Dans ma petite tête, j'avais cru comprendre que
tous ces enchaînements de ruptures de fibres
conduisant au déchirement, toutes ces bousculades
de brebis les conduisant à sauter dans le gouffre,
et tous les soubresauts annonçant et produisant le
basculement final du climat n'avaient des chances
de se produire que pour des
nombres d'interactions gigantesques ???*



HAA HAA HAA



*Bravo Mouette! Tu m'impressionnes!
Ça montre en tous cas que l'intelligence
n'est pas directement reliée à la taille du cerveau!
Et qu'en plus tu vois les choses de haut.*

*Oui, effectivement. Cette « explosion » du
nombre d'interactions au voisinage du point
critique est une caractéristique (pour ne pas
dire une définition) de ce point critique. Le
modèle numérique pourra tenter de décrire le
comportement du troupeau de « super
moutons », mais ne pourra jamais lui faire
sauter la falaise !*



*Et de la même façon, les calculs numériques
peuvent très bien simuler l'évolution du climat à
condition que le VRAI climat ne se dirige pas à
court terme vers un basculement.*

*Mais si "par hasard" c'était le cas, les super moutons
n'y verraient que du feu...et les prévisions devraient
être revues à la hausse de plus en plus fréquemment,
sans voir venir la catastrophe, comme dans le cas du
navigateur qui écope tranquillement son canoë alors
qu'il fonce sur la cataracte.*



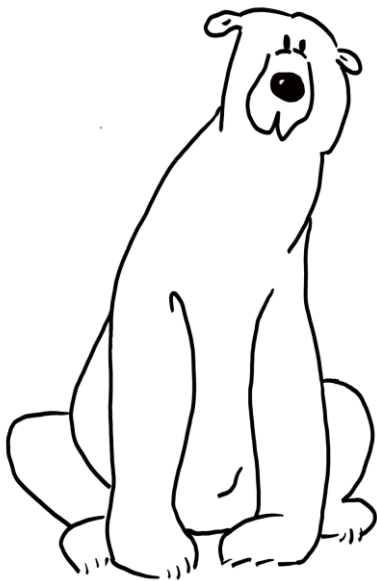
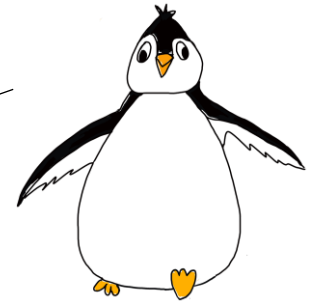


Et voilà, et voilà!

C'est bien ce que je disais tout à l'heure!
Si on ne peut rien prévoir, on est vraiment
dans le guano jusqu'au bout du bec !

Bon, ça va, Mouette, moi je ne sais pas
faire de loopings et rigoler comme toi,
mais soyons positifs.

Si les simulations ne marchent pas en cas
de basculement, il y a peut-être quelque
chose d'autre à faire ???



Et d'abord, est-ce que ces basculements
existent vraiment?
Pourquoi serions-nous concernés ?

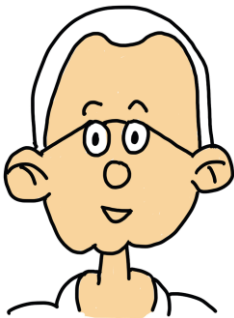
Tout simplement parce que des
paléoclimatologues ont analysé des
basculements climatiques similaires qui
ont vraiment eu lieu dans le passé. Et
certains de ces climatologues ont
envisagé une possible application à la
situation actuelle (Livina et al., 2007,
Lenton 2011, Lenton et al., 2012a, 2012b,
Bathiany et al., 2016, Steffen et al., 2018, Lenton
et al. 2019). Nous en voyons déjà
maintenant des signes annonciateurs.





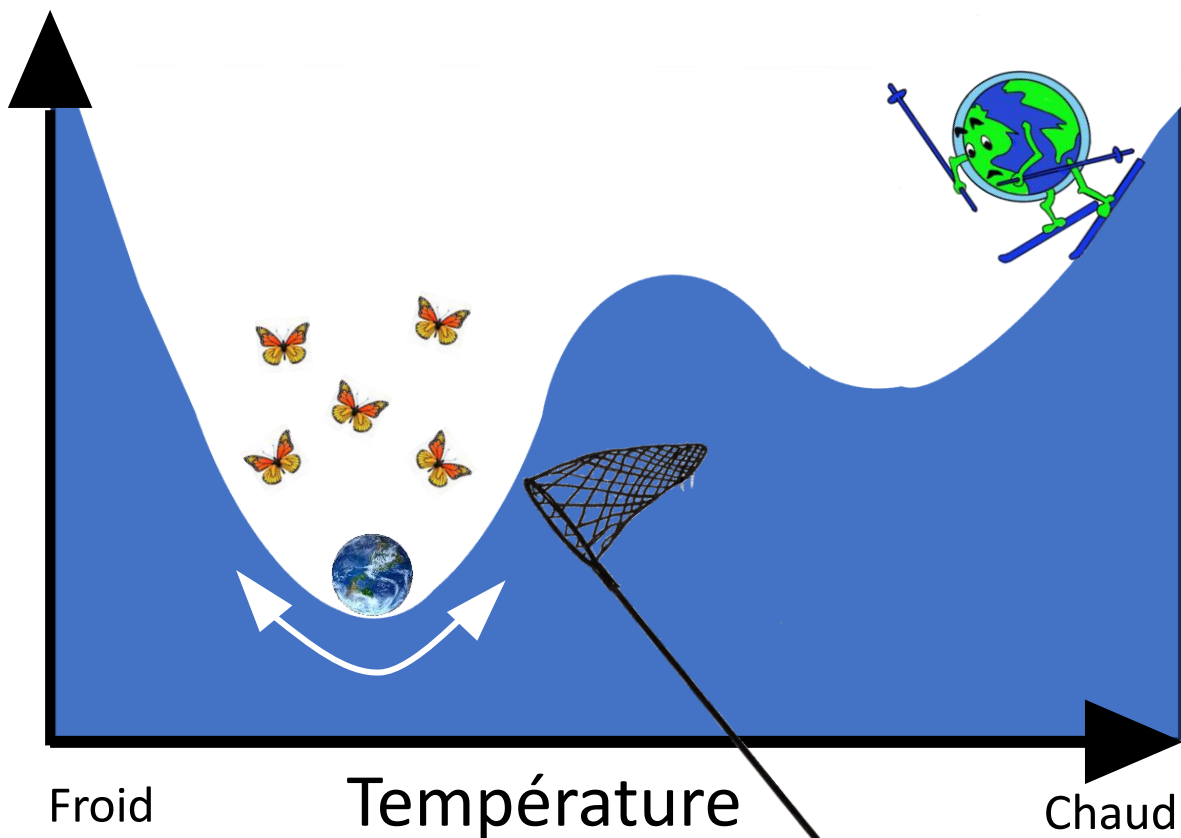
Et pour répondre à ta question, Manchot, oui, bien sûr, il y a quelque chose à faire ! D'ailleurs, je crois qu'à ce stade il est grand temps de retourner sur le terrain.. Plutôt que d'essayer de caricaturer la Nature en la numérisant pour tenter de deviner ce qu'elle risque de faire dans le futur, essayons donc de l'écouter et de comprendre ce qu'elle est DÉJÀ en train de nous dire maintenant.

Est-ce que par hasard tu ne ferais pas allusion aux soubresauts annonciateurs d'un basculement proche ?



Tu as tout compris, Manchot. En physique, ça s'appelle des "fluctuations précritiques", ou de « l'adoucissement critique ».



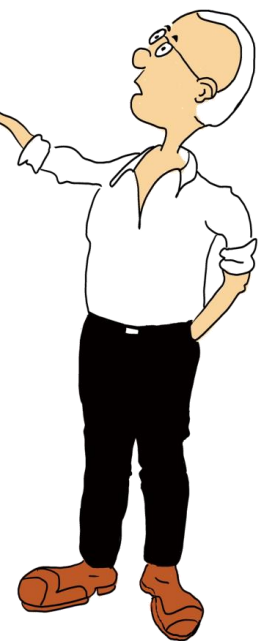


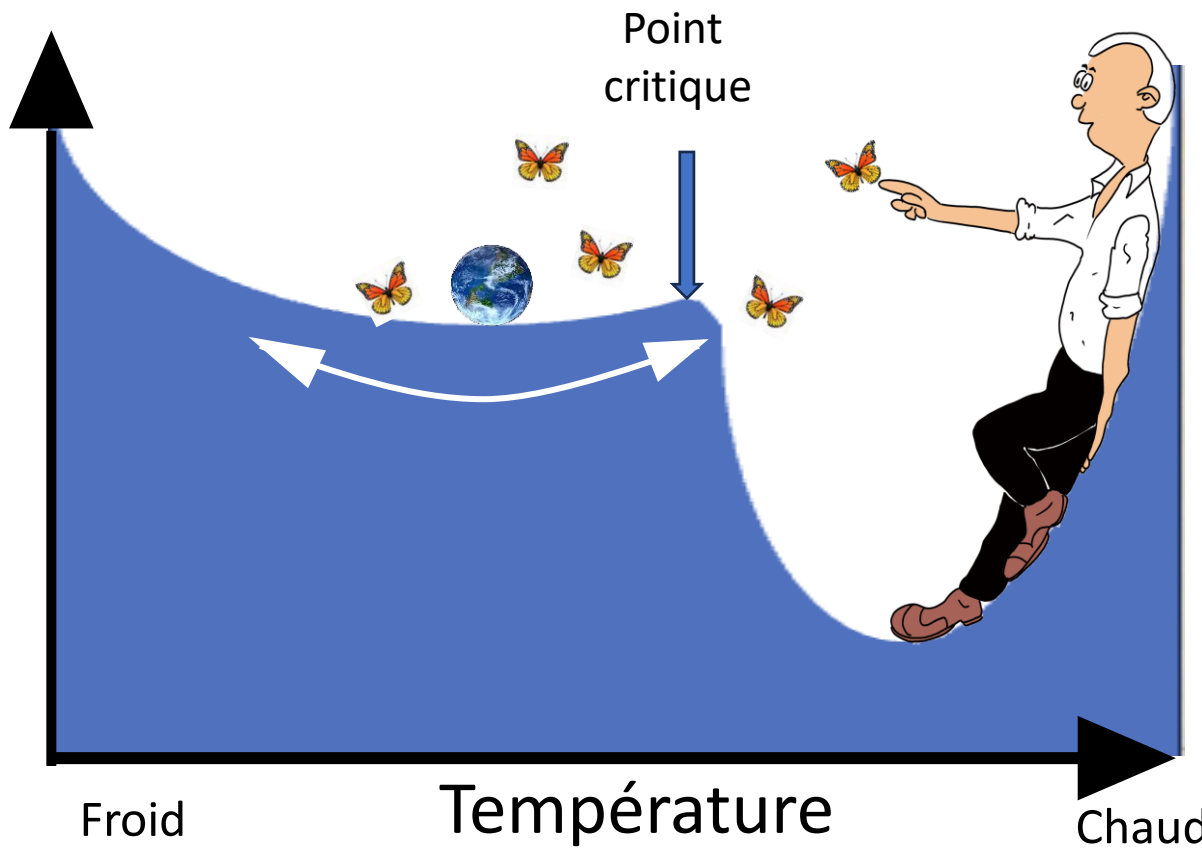
*L'explication est très simple
(Louchet, 2016, 2022, 2023a, 2023b, 2025) .*

Sur ce graphique, l'axe des températures est horizontal, froid à gauche, chaud à droite.

A gauche, la Terre est en équilibre comme le serait un ballon au fond d'une vallée. C'est cette Terre là que James Lovelock avait supposée stable dans un état autorégulé et qu'il avait nommée ... Gaïa!

A cause de quelques papillons inconscients qui battent des ailes en Nouvelle Zélande ou ailleurs, le ballon représentant la Terre oscille légèrement de gauche à droite et inversement, comme autant de fluctuations de la température. Ce sont les petits coups de chaud ou de froid, habituels, autour d'une valeur moyenne proche du fond de la vallée.





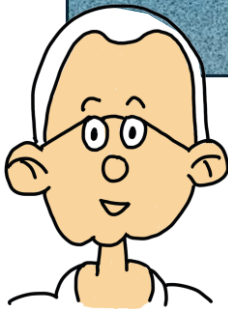
Mais si maintenant on augmente progressivement la quantité de CO_2 dans l'atmosphère, le profil de ces vallées va se déformer.

La Terre sera toujours en équilibre au fond de la vallée, mais ce fond de vallée se sera déplacé vers la droite. Il fera de plus en plus chaud.

Et en plus, comme le fond de la vallée s'est aplati, les battements d'aile de papillon venues des antipodes ou d'ailleurs se traduiront par des oscillations de température de plus en plus grandes. Les canicules et coups de froid seront de plus en plus forts, et il en sera de même des pluies, sécheresses, tempêtes, ou incendies qui leur sont associés, et qui annoncent la proximité du point dit critique au delà duquel le système basculera dans la vallée suivante.

Enfin, autre point fondamental, les oscillations deviendront de plus en plus asymétriques. En effet, on voit sur la figure précédente que la vallée s'aplatit davantage à droite qu'à gauche, c'est à dire en direction du point de bascule. Les canicules seront plus violentes que les coups de froid.

Ce sont les fameuses oscillations précritiques bien connues en Physique des transitions de phase, et appelées événements extrêmes en climatologie, à cause du rôle disproportionné d'événements rares mais de grande amplitude. Se fier uniquement aux valeurs moyennes peut masquer la survenue des événements les plus extrêmes. C'est ce qu'on appelle la Théorie du Cygne Noir (Taleb 2007, 2010).



La Théorie du Cygne Noir? Je ne me souviens pas en avoir vu un seul de toute ma vie !

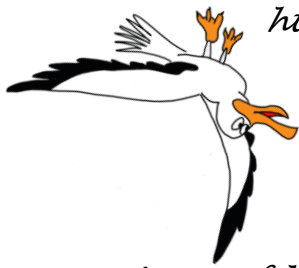


Rien de surprenant ! Personne en Europe ne croyait à l'existence de cygnes noirs jusqu'à ce que des navigateurs hollandais en observent en Australie en 1697 ! Mais revenons justement à nos événements extrêmes, Au voisinage du point critique (point de basculement dans notre cas) (Bak et al. 1987) les mesures se répartissent sur une distribution en loi puissance (dite invariante d'échelle)

[:https://en.wikipedia.org/wiki/Power_law_critical](https://en.wikipedia.org/wiki/Power_law_critical)

Ces distributions diffèrent de celles dites en cloche en ce qu'elles ne sont pas symétriques, à cause justement d'événements de grande amplitude qui étendent la courbe vers la droite, et que leur rareté, comme je le disais, peut faire échapper à notre vigilance. Utiliser dans ce cas des moyennes de simulations successives pour s'affranchir de l'effet « aile de papillon » comme mentionné par exemple par (Lécroart et Ekeland 2020, p.33) semble problématique. A l'approche d'un point critique, il est bon de se souvenir de la phrase de Durrell : « Les bouées marquant les hauts-fonds étant souvent mal positionnées, les navigateurs sont invités à faire preuve de vigilance lorsqu'ils naviguent dans ces zones » (Durrell 1959).

On peut se convaincre très facilement des caractéristiques de ces oscillations à l'approche du point critique en faisant une petite expérience avec un bouchon sur une feuille de carton, qui reproduit les schémas des figures précédentes :



<https://www.youtube.com/watch?v=EN16HcawPXU>

HO HO HA HA



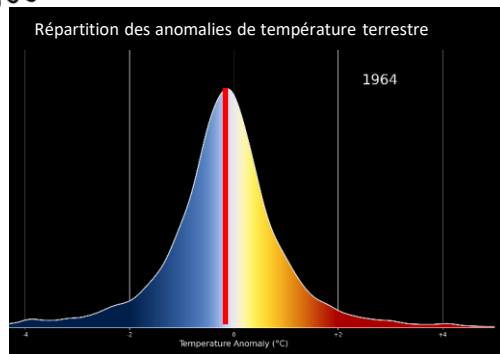
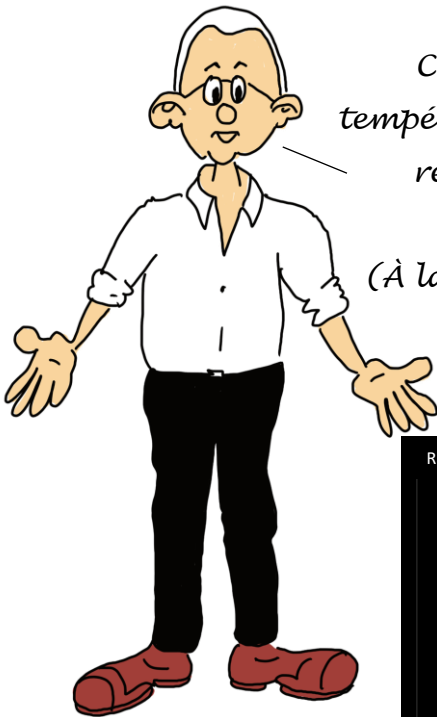
Non, Eifel, tu ne vas pas me faire gober ça! Je t'entends encore dire que le climat est un système complexe constitué d'un très grand nombre d'éléments en interaction! C'est quelque chose de très compliqué. Et tu crois que tu vas me convaincre avec un simple bouchon de liège sur un vulgaire bout de papier?

Et pourtant si !

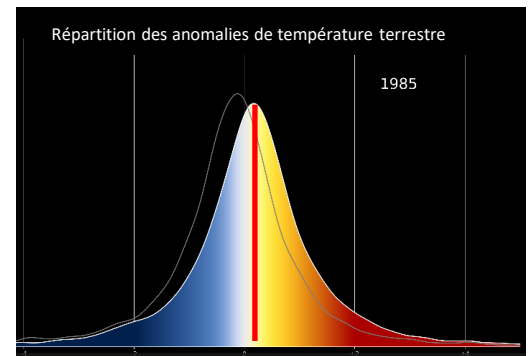
C'est exactement ce que montrent des enregistrements de températures des terres émergées mesurées depuis 1964 et publiées récemment (2025) par la NASA dans une très belle vidéo:

<https://svs.gsfc.nasa.gov/5452>

(À la suite de l'arrêt du financement fédéral, la NASA n'assure plus la mise à jour de ce site).

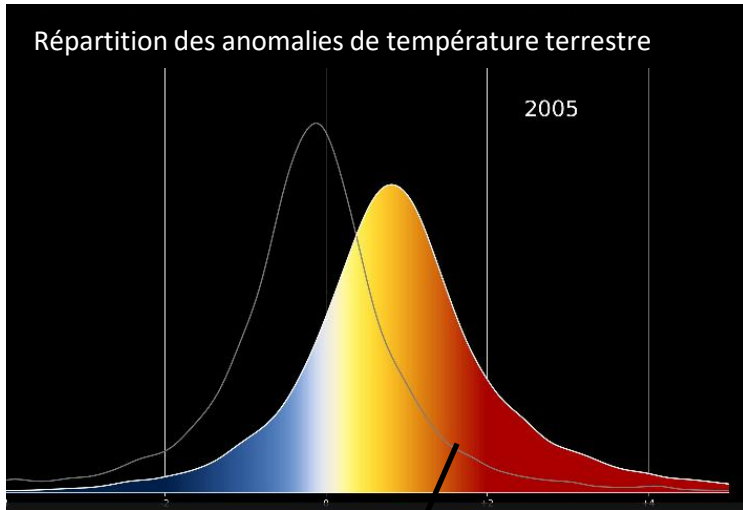


1964



1985

On y voit que dans les années 60 à 90 la distribution des températures se décale vers la droite mais reste relativement serrée (la position de départ et en trait fin sur la figure de droite). Les températures fluctuent faiblement et de façon symétrique autour de la moyenne,, mais par contre



... par contre effectivement, lors des décennies suivantes, les choses se gâtent. Lors de la poursuite du réchauffement (on voit la situation de départ en trait fin), la distribution commence à s'élargir à mesure qu'elle se décale vers les hautes températures, ce qui signifie que l'amplitude des fluctuations augmente. Canicules et coups de froid plus intenses, en association évidemment avec tempêtes plus violentes, inondations et sécheresses plus dévastatrices, etc...

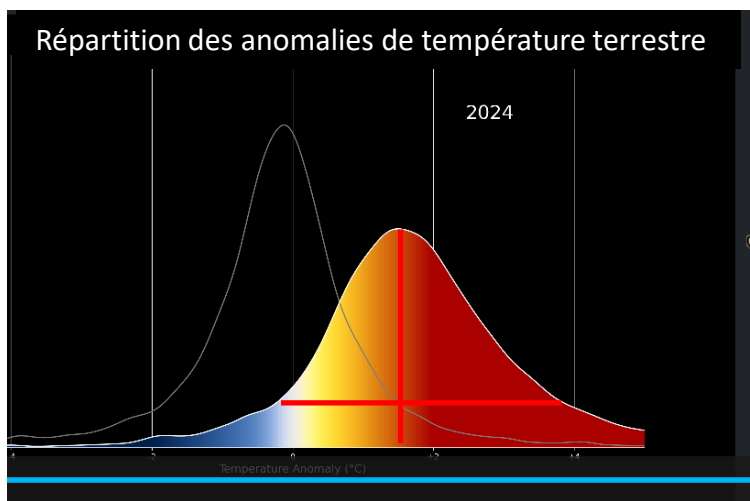


Franchement, je n'avais pas besoin de toutes ces courbes pour m'en rendre compte, figure toi !



Oui Manchot, évidemment, mais Mouette semblait vraiment en avoir besoin pour admettre que les schémas "bleus" des pages précédentes et l'expérience du carton et du bouchon ont du sens !

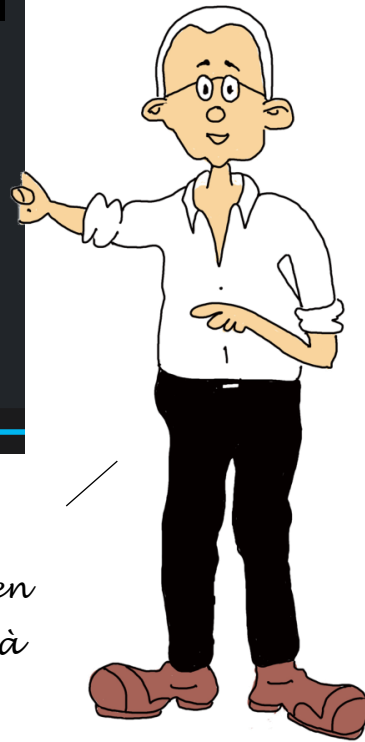
Cette publication de la NASA confirme totalement à la fois ce que montraient les fameux schémas bleus et l'expérience du carton, mais aussi ce que nous ressentons d'année en année. Et dans cette publication, ces mesures nous en donnent une preuve précise, quantitative et irréfutable.



2024

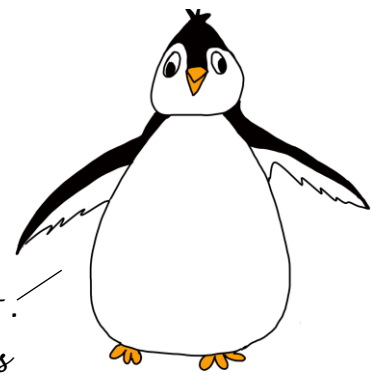
Mais il y a plus intéressant encore !

Au cours du temps, les courbes deviennent de plus en plus asymétriques. Elles s'élargissent davantage à droite plus qu'à gauche du Sommet de la distribution. C'est exactement ce que prévoyaient les schémas bleus des pages précédentes. (Louchet, 2025)



Et alors ? Qu'est ce que ça veut bien dire ?

Et bien exactement ce que disait Eiffel à l'instant. C'est une preuve de plus, incontestable, que nous nous approchons du basculement.



Et maintenant j'aimerais insister à nouveau sur deux choses. La première est qu'il s'agit bien là d'un effet global, d'une propriété nouvelle qui émerge des interactions entre tous les éléments du système. La seconde est que cette déformation des distributions vers la droite est ce que l'on attend qualitativement lors du passage progressif d'une courbe en cloche de type "gaussienne" (événements peu corrélés) à une loi puissance, caractéristique d'un système très fortement corrélé (état critique), dans lequel les événements les plus probables sont les plus petits, alors que les plus gros sont les moins fréquents, les fameux "cygnes noirs", responsables de "l'épaississement" de la queue de distribution à droite. On retrouve ce genre de distribution par exemple dans le modèle du tas de sable de Bak qui définit la notion de criticalité auto-organisée

(Bak et al., 1987).

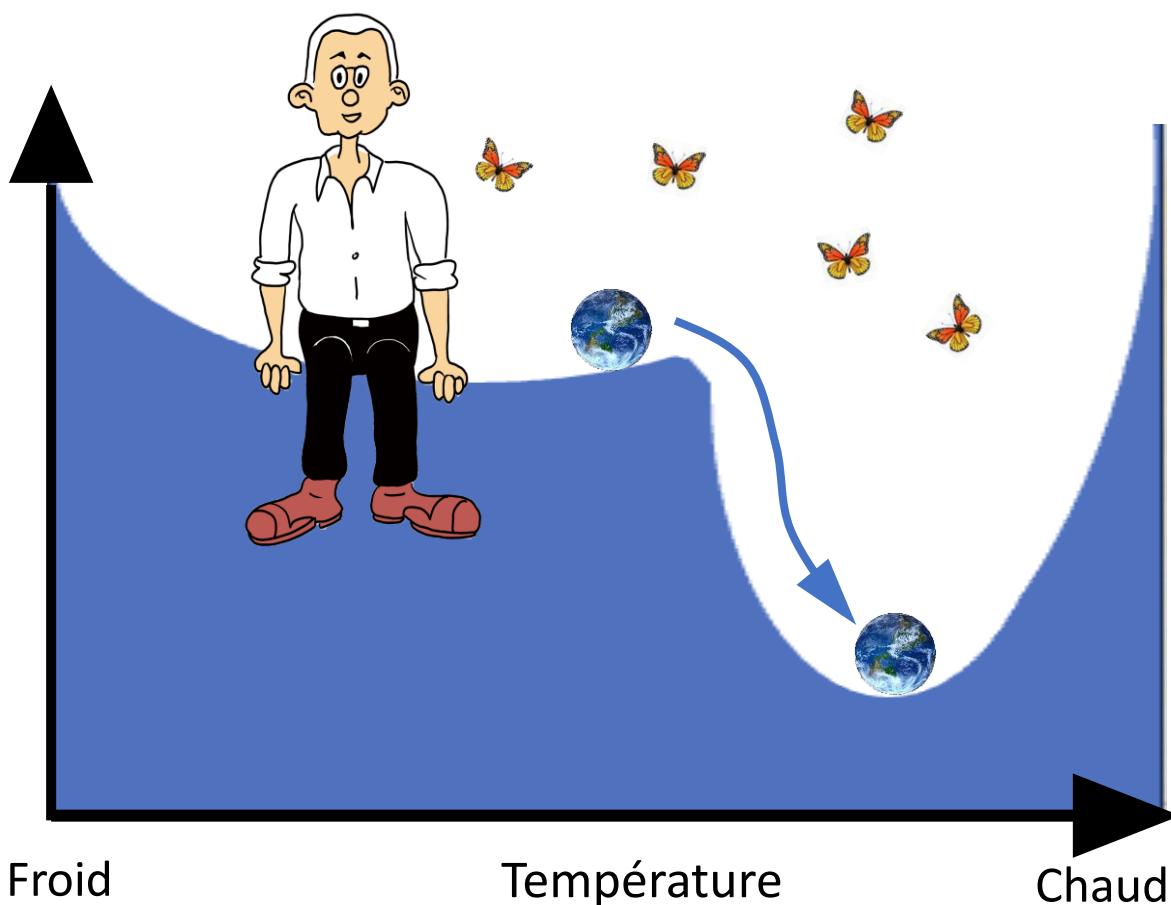
*Mais si là, Eifel, on
décidait de diminuer la
quantité de CO₂ ?*

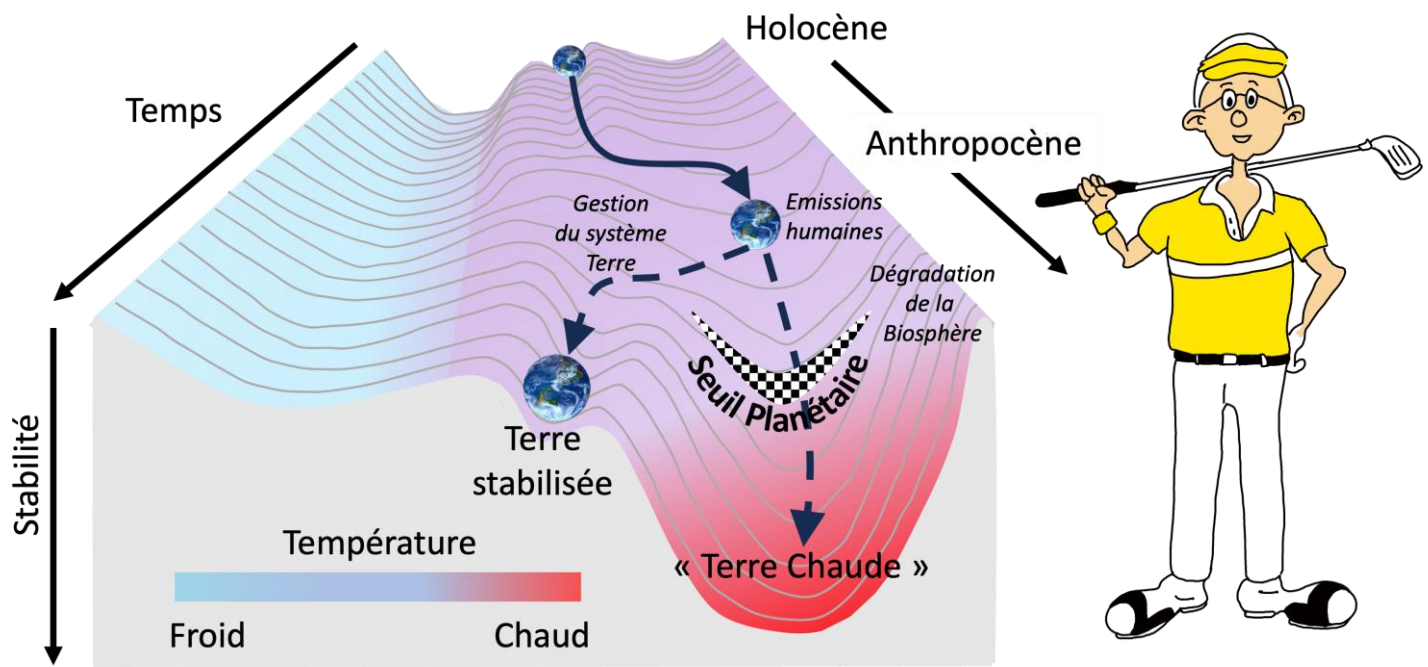


*Oui, bien sûr! On reviendrait évidemment à
la position de départ.*

*Mais il faudrait faire très très vite, parce que
si on tardait trop,.....*

*... notre pauvre planète aurait entre temps
basculé de l'autre côté, au fond d'une vallée
voisine dont on ne connaît strictement rien
puisque personne n'y est encore jamais allé.*



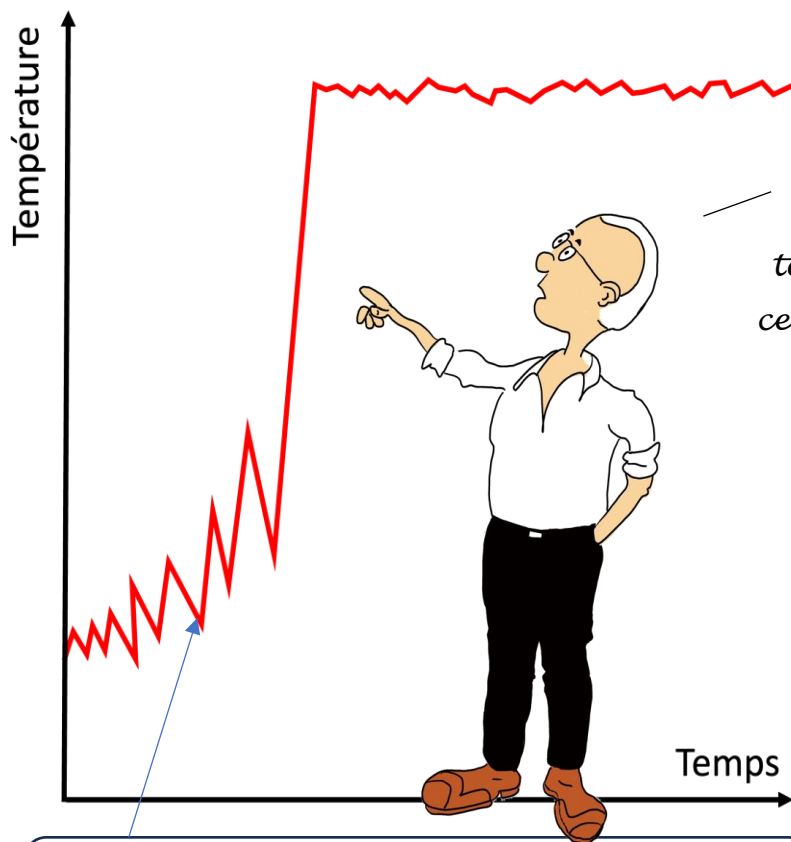


Adapté de: Steffen W. et al., 2018

On peut illustrer ce basculement d'une autre façon. Sur ce schéma, le temps s'écoule du fond du schéma (Holocène) vers l'avant (Anthropocène), et la "stabilité" est représentée par l'axe vertical (d'autant plus stable qu'on est plus bas). Quant à la température, elle est illustrée par la couleur, froid en bleu, chaud en rouge.

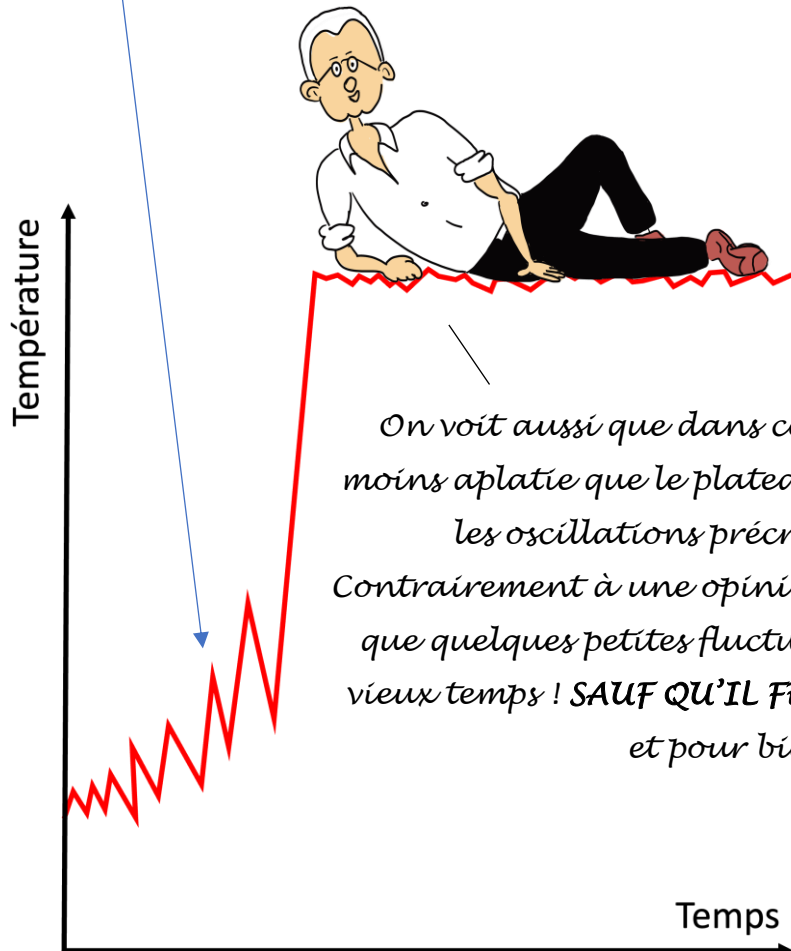
Notre planète arrive "du fond des temps", et roule vers l'avant, en suivant le fond de la vallée où elle se trouve. Mais à un moment, la crête qui la sépare de la vallée de droite, plus chaude, s'estompe peu à peu. La Terre hésite entre la trajectoire stabilisée (plutôt bleue) et le basculement vers le chaud (en rouge). Un rien suffirait à l'orienter d'un côté ou de l'autre.

C'est là que nous nous trouvons. Saurons nous apporter le petit grain de sagesse qui lui permettra de rester dans le bleu, ou la laisserons nous bifurquer vers le rouge ?



Ce saut correspondrait à une augmentation rapide de température, entre celle du col et celle du fond de la vallée de droite de la figure précédente.

Succession d'évènements extrêmes (instabilités précritiques)

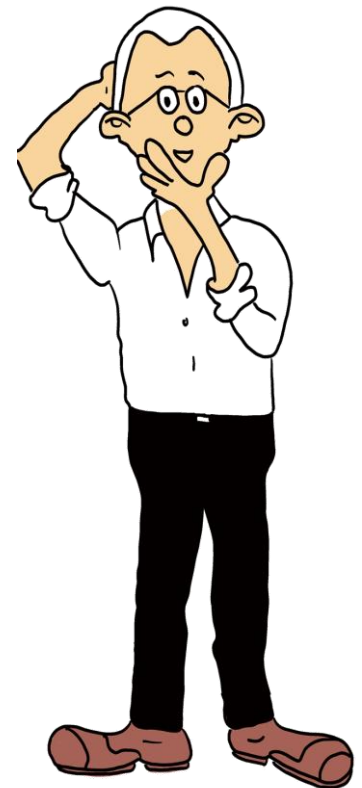


On voit aussi que dans cette nouvelle vallée, a priori moins aplatie que le plateau qui précède le basculement, les oscillations précritiques auront disparu. Contrairement à une opinion répandue, il ne restera plus que quelques petites fluctuations... comme dans le bon vieux temps ! SAUF QU'IL FERA BEAUCOUP PLUS CHAUD... et pour bien longtemps



Et d'ailleurs c'est en se basant sur une analyse de ces signes précurseurs du basculement, ou du « *collapse* » comme on dit en anglais, qu'une équipe de géophysiciens de Zürich a pu il y a quelques années développer une méthode pour prévoir la date d'effondrement des séracs dans les glaciers (Faielletaz et al., 2015, 2016). Ils enregistraient par balises GPS les fluctuations de la vitesse d'écoulement du glacier. « L'emballement » de ces signes précurseurs leur a permis de déterminer la date du *collapse* avec une précision **IMPRESSIONNANTE**, de 24 à 48h, ce qui permettait d'évacuer à temps les villages situés en aval.

C'est aussi une analyse de ce type, basée sur l'approche d'un point critique, qu'une équipe de Copenhague a pu prédire le créneau du futur *collapse* de la circulation des courants océaniques en Atlantique, ou « *AMOC* » (Peter & Susanne Ditlevsen 2023), qui est une quille maîtresse du jeu de quilles du climat, comme on verra un peu plus loin.

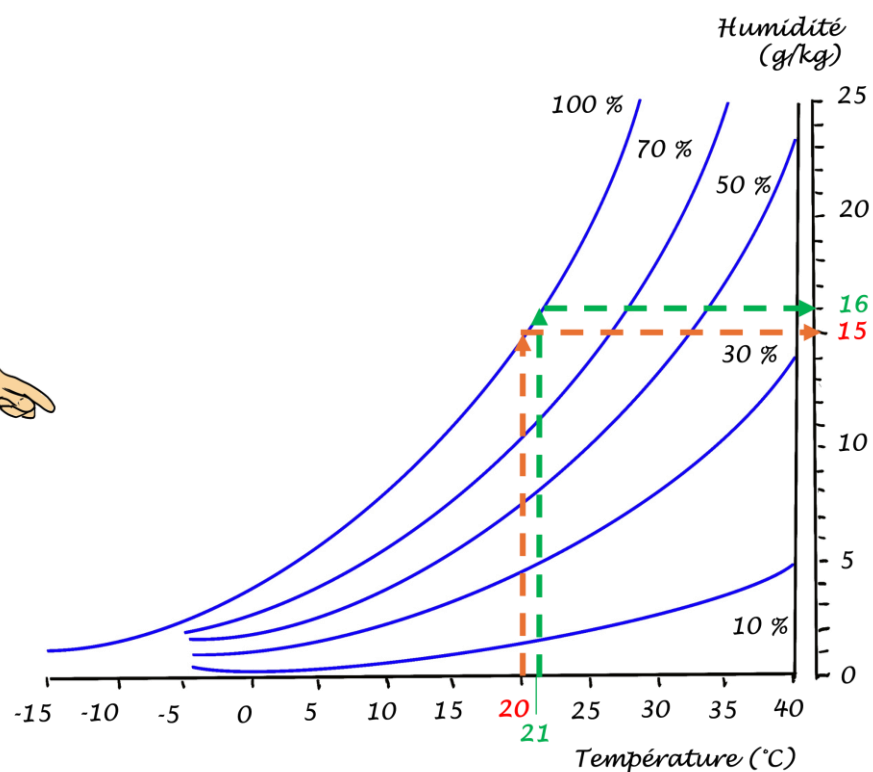
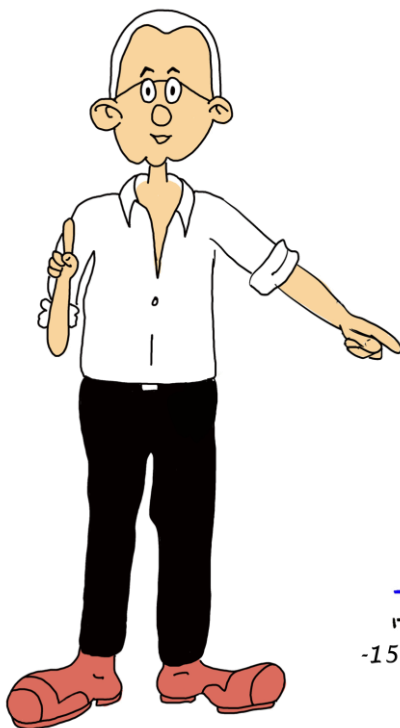


Donc, si je te comprends bien Eifel, après le basculement on n'aura plus ni fortes canicules, ni coups de froid, ni tempêtes ni inondations, mais il fera nettement plus chaud ?

J'entends bien ce que tu dis, Manchot. Mais j'entends souvent dire aussi que ces épisodes de pluies intenses que nous subissons, provoquant inondations et autres catastrophes, viendraient simplement de l'augmentation des températures due au réchauffement global. Une atmosphère plus chaude contiendrait davantage de vapeur d'eau, et donc donnerait plus de pluies.



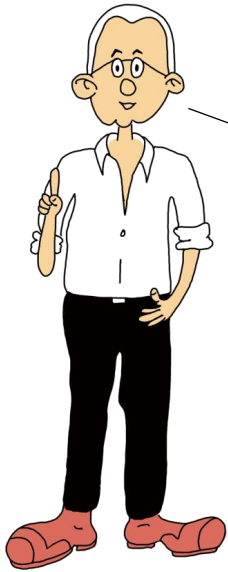
Ça paraît vrai à première vue. L'équation de Clausius-Clapeyron représentée par ce graphique (courbe du haut, 100% de saturation) montre en effet que la quantité de vapeur maximum que peut contenir l'atmosphère à une température autour de 20°C augmente d'environ 7% par degré supplémentaire. Ce serait encore davantage à plus haute température.



Relation entre humidité relative et proportion de vapeur à $P = 101.325 \text{ kPa}$. Les courbes inférieures représentent les zones en sous-saturation.

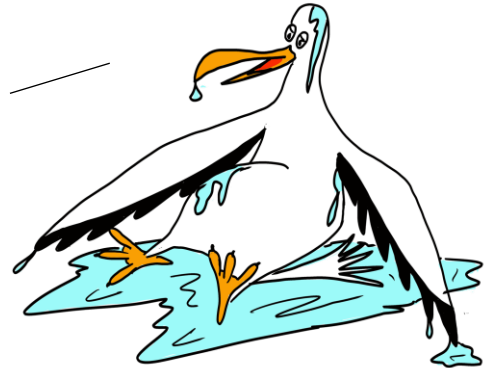
Adapté de: https://www.eoas.ubc.ca/books/Practical_Meteorology/prmet/Ch04-Moist.pdf

Hé, 7% c'est quand même pas rien, non ?



Attention, Manchot, c'est 7% de quoi ? Je n'ai pas dit 7% de la quantité de vapeur qu'on aurait au dessus d'une casserole d'eau bouillante ! Cette eau bout à 100°C parce que 100°C c'est la température pour laquelle la pression de vapeur saturante devient égale à la pression atmosphérique, qui ne peut donc plus « la retenir ». Par contre ce dont je parle c'est 7% de la quantité de vapeur présente dans l'air déjà saturé à 20°C avant d'augmenter la température de 1°C. On voit sur le diagramme qu'autour de 20°C cette quantité de vapeur « saturante » est de 15g / kg d'air, soit 1.5%. Et 7% de 1,5 %, ça fait en gros 1 pour 1000 !!!

Ha ha ha ! Ridicule ! Mais alors, Eiffel, je ne vois pas comment expliquer tous ces champs inondés, ces rivières débordantes, .que je peux voir en survolant de nombreux pays !



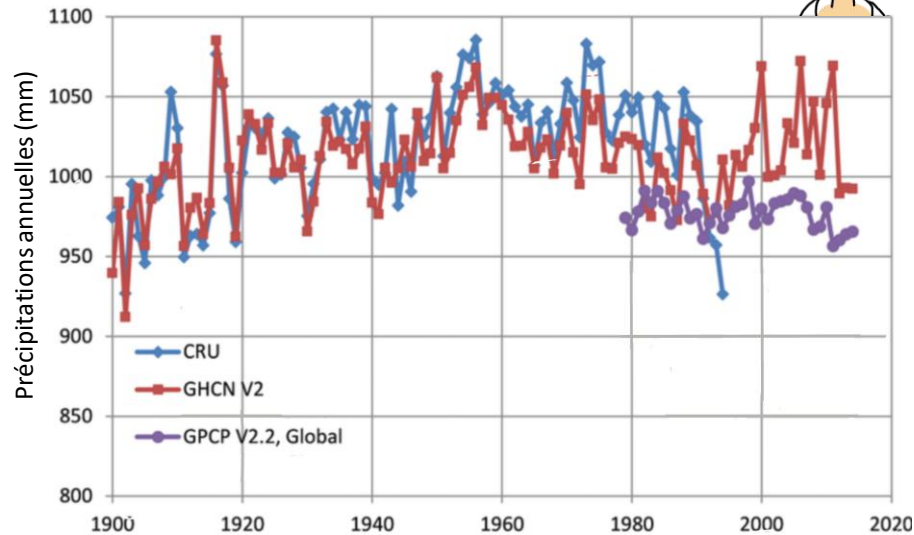
Ma chère Mouette, lors de tes voyages lointains, as-tu jamais vu reverdir ni le Sahara ni les déserts d'Asie centrale ? Suppose un instant que ces 7% soient la bonne explication. Comment alors comprendre les redoutables sécheresses qui alternent, selon le lieu et la date, avec ces trombes d'eau ?

D'ailleurs, si on regarde le graphique ci-dessous, on voit qu'il n'y a aucun signe manifeste d'augmentation du niveau annuel moyen des précipitations depuis... 1920 (il y a plus d'un siècle !), malgré le réchauffement que nous connaissons.



Comme tu dirais, Eifel, quand les observations contredisent la théorie, ce ne sont généralement pas les observations qui sont fausses !

Eh oui ! L'explication est évidemment à trouver ailleurs.



Evolution des précipitations globales moyennes d'après diverses banques de données.

http://climexp.knmi.nl/select.cgi?id=someone@somewhere&field=gpcp_22),
<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/precip/>, (<http://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/ghcn-gridded-products/>).



Ouh, je te vois venir... Tu penses (encore une fois) à ces oscillations précritiques dont tu nous as parlé il y a un instant ?

Bien sûr. Ça me semble être la seule explication raisonnable. Ça résulte de fluctuations locales dans le temps et dans l'espace. L'atmosphère n'est pas toujours et partout saturée en vapeur d'eau, loin de là. Et il ne pleut quelque part que lorsque la vapeur atteint localement la saturation, à cause d'une fluctuation de température, ou de l'arrivée d'une masse d'air humide dans une zone froide par exemple. Et donc ce n'est pas parce que la quantité maximum de vapeur autorisée augmenterait de 7% qu'il y aurait nécessairement 7% de pluie en plus!!! (Louchet, 2025)

En moyenne il ne pleut pas davantage, comme le montre la courbe ci-dessus, mais il pleut de façon plus violente et plus intermittente.

Et il y aura des moments où ...





*Pas une goutte de pluie, pas un
souffle de vent, je rêve des
tempêtes d'antan !*



*Tu dis qu'il fera nettement plus chaud, mais
que ce ne sera pas une canicule ???*

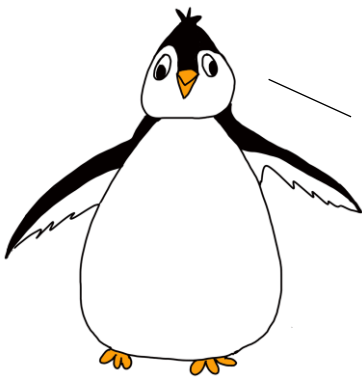
*Non, ce ne sera pas une canicule. Une canicule
c'est une période très chaude par rapport à la
température « normale », qui est suivie justement
d'un retour à la normale. Alors qu'ici, il fera très
chaud tout le temps, et ce sera la nouvelle
température « normale »*





Et il ne pourrait pas y avoir des canicules qui s'ajouteraient à cette période déjà très chaude ?

Oui, ce n'est pas exclu. Mais ça devrait être des "petites canicules", suivies de petits coups de « froid » (ou de moins chaud), car la vallée étant a priori étroite, les oscillations seront faibles.



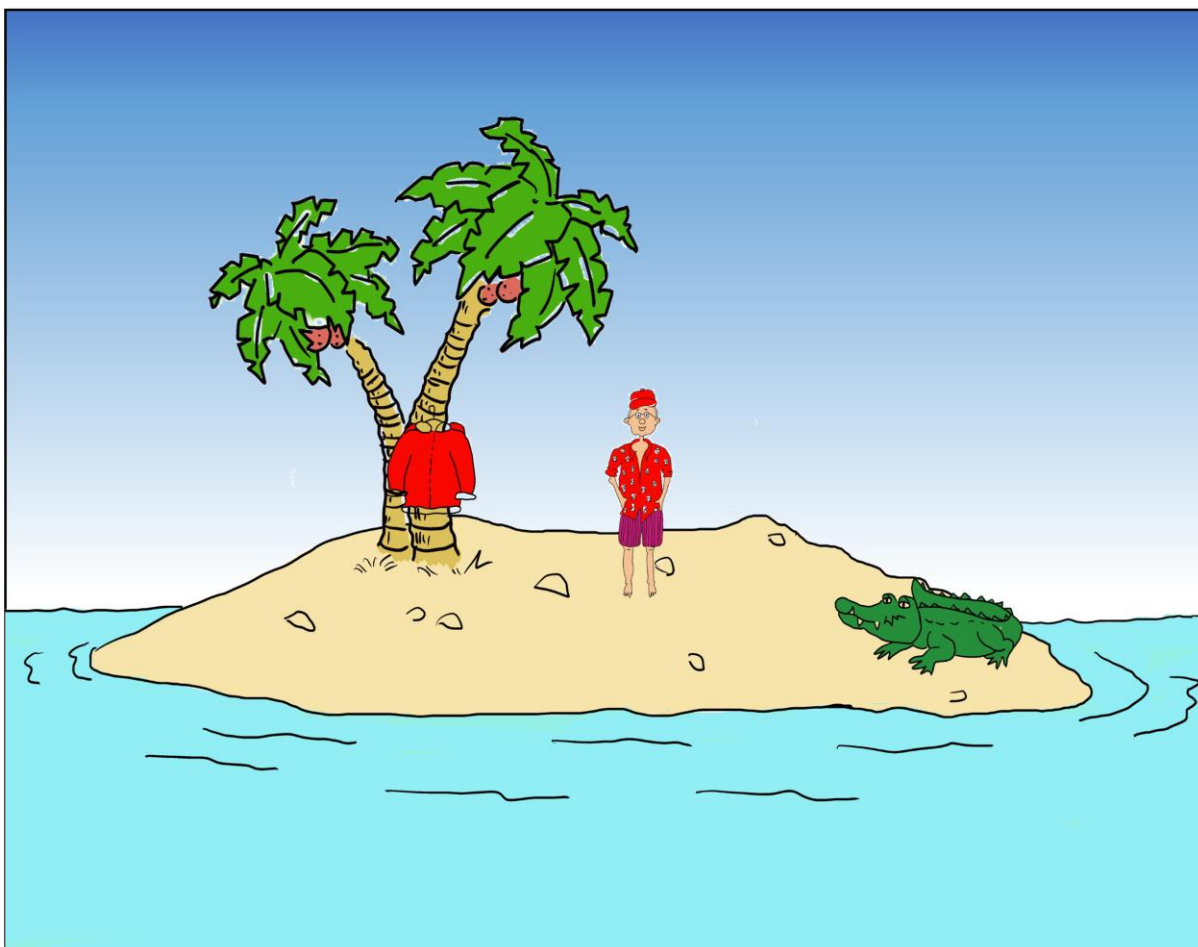
Mais moi aussi j'insiste, Eiffel! Si dans cette nouvelle vallée dans laquelle on est tombés, on diminuait très violemment non pas l'émission de CO₂, mais la quantité totale de CO₂ contenue dans l'atmosphère, jusqu'à redescendre au niveau préindustriel, on pourrait peut-être revenir au profil de la première figure et enfin se retrouver au frais ?

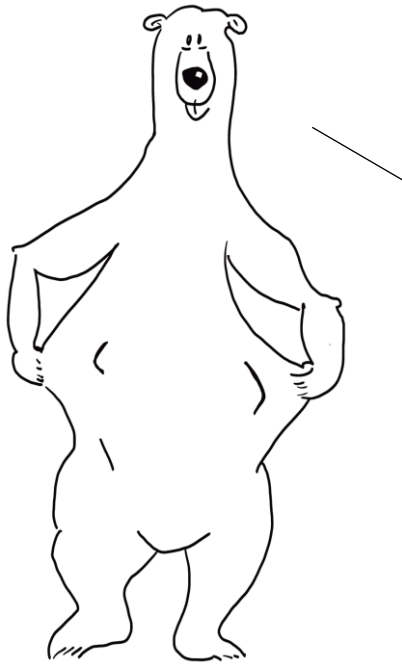
*Tu dis n'importe quoi Manchot!
Pour quelqu'un qui ne sait pas voler, tu devrais te rendre compte que pour revenir à la normale, il faudrait escalader et repasser la barrière vers la gauche, alors que la Terre resterait toujours coincée dans le creux de droite !*



*Encore une fois, tu as raison, Mouette !
On serait bel et bien coincés. Ce serait une nouvelle Gaïa, mais une Gaïa nettement plus chaude. Il faudrait sans doute attendre quelques centaines de milliers d'années un improbable « alignement des astres » qui s'ajouterait à nos efforts éventuels de réduction du CO₂ pour nous aider à revenir en arrière. Sauf que quand je dis « nous » il est plus que probable que nous nous serons tous évaporés d'ici là !*

Quant à moi, dans les temps présents, je crois bien que je vais être obligé de vendre (mais à qui ?), et rapidement, tous mes parkas, moufles et bonnets fourrés et me construire une paillotte au Groenland! Si je choisis bien mon coin, après la montée des océans, je me retrouverai sur une petite île déserte au nord du cercle polaire. Pendant ce temps-là, les Flandres auront en grande partie disparu, de même que la Camargue ou les atolls du Pacifique, et Paris sera sans doute en bord de mer. Ca réduira bon nombre de trajets lors des départs en vacances, mais un peu tard en ce qui concerne le CO₂ !!!





Et moi, qu'est-ce que je vais faire de ma belle fourrure ?

Il paraît qu'il y a des gens qui recommandent de ne pas vendre la peau de l'ours ... avant de l'avoir ...

OH NON !!! NON !!!

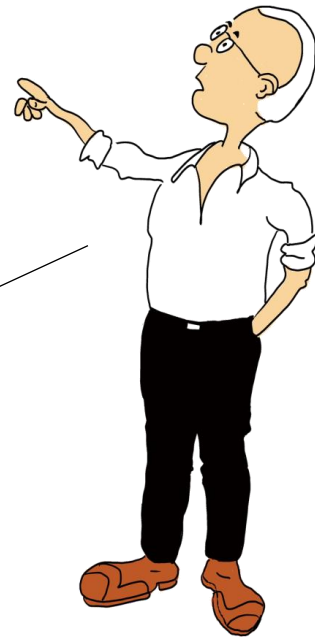
Dis-moi, Eiffel, toi en qui j'ai confiance, quand basculerons-nous ? et vers quelles températures ?

Quand ?



Une publication de l'Université de Copenhague en juillet 2023 dans Nature (Ditlevsen et al. 2023), que j'ai mentionnée tout à l'heure, prévoit un effondrement de l'AMOC (en gros la circulation des courants océaniques en Atlantique) dès 2025, et plus probablement vers 2050, ce qui pourrait entraîner par un impressionnant jeu de quilles le basculement du climat

(références 1, 2 et 3 de Ditlevsen et al.). Ce basculement pourrait à son tour en provoquer d'autres, dont certains sont probablement déjà en route, en particulier en géopolitique.

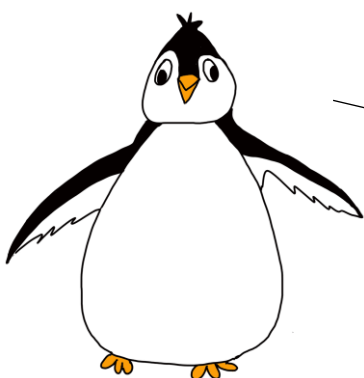


Un indice supplémentaire est donné dans deux publications récentes (St George, S., 2019, Neukom, 2019) qui soulignent la particularité du réchauffement actuel. Contrairement aux petits âges glaciaires des quelques siècles précédents, qui se produisaient tour à tour sur des continents différents, le réchauffement actuel concerne toute la planète, de façon synchrone.



Incroyable, ça me rappelle étrangement le troupeau de moutons qui devient critique, comme tu l'expliquais tout à l'heure !

*Oui, bien vu ! C'est un indice que nous sommes quasiment arrivés au point critique !
C'est donc incroyablement proche.. Quelques années ?
Peut être avons nous déjà un pied dans le vide ?
L'humanité saura-t-elle réagir à temps ?*

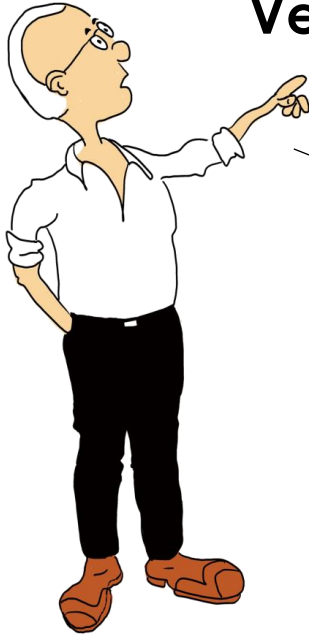


Mais c'est fou. 2050, 2025, c'est demain !

*Oui, c'est demain, comme tu dis !
Mais vers quelle température irons-nous ?
Que restera-t-il de ma banquise ?
Et de mes phoques ?*

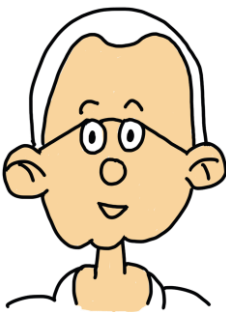
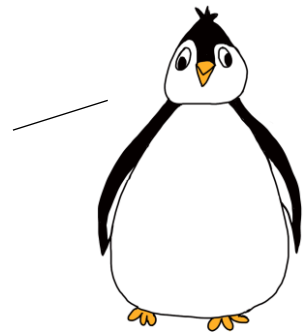


Vers quelle température donc ?



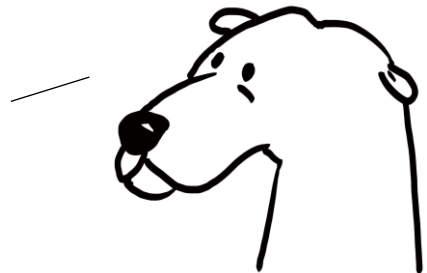
Difficile à dire. Si on se réfère au PETM dont j'ai parlé (-56 millions d'années) où s'était injectée en gros la même quantité de CO₂ que celle que nous sommes en train d'introduire, on s'était retrouvés autour de 6 à 8°C au-dessus de la période qui a précédé, juste après l'extinction des dinosaures (et de bien d'autres espèces). (McInerney et al. 2011)

C'est absolument énorme. Peu d'espèces y résisteront ! Qu'en sera-t-il des ours, des manchots, des mouettes et des humains ???

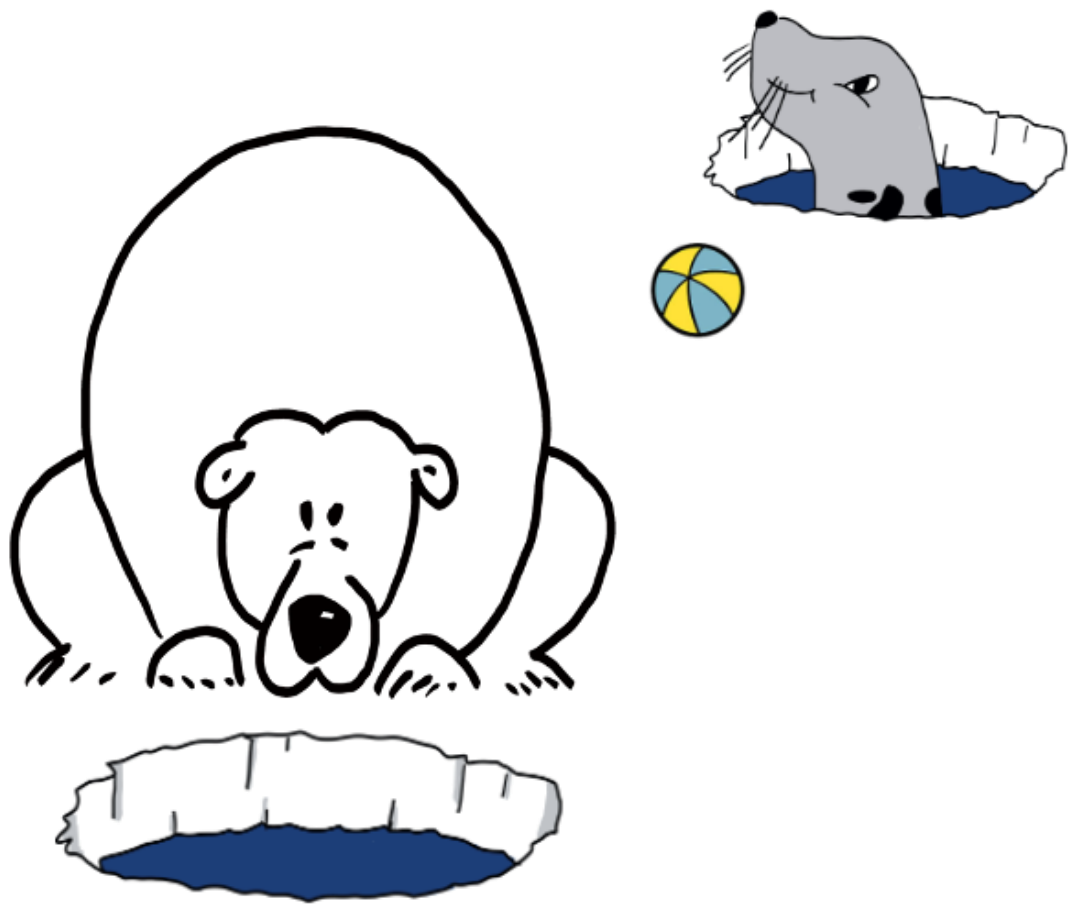


J'en ai déjà parlé tout à l'heure. Oui, bien des espèces, animales et végétales, ont du souci à se faire, d'autant plus qu'elles sont interdépendantes. Et en particulier les humains. Et ce ne serait que justice, car ils sont hélas responsables de ce basculement en cours !

Si je comprends bien, je n'aurai plus de phoques à attraper dans les trous de la banquise ?



Oui, ce sera dur

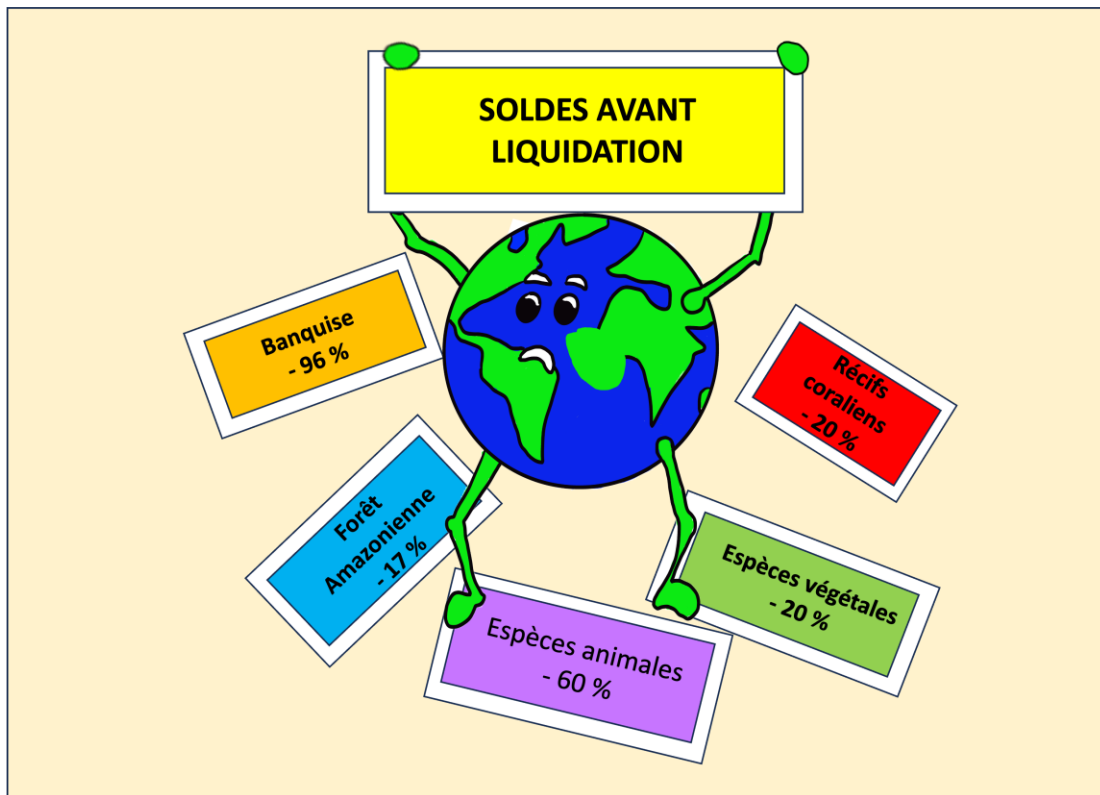


Mon cousin Grizzly qui habite du côté du Wyoming m'a dit que les saumons de Yellowstone River étaient délicieux. Tu penses qu'ils remonteront jusqu'ici ?

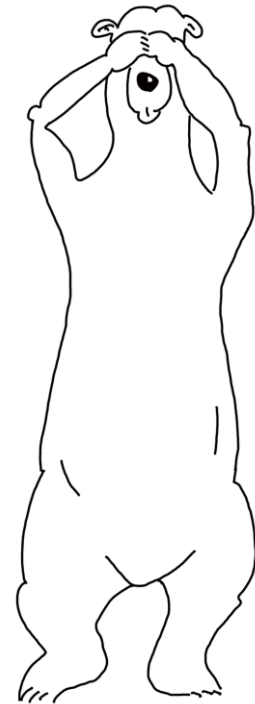
*A moins qu'il m'invite chez lui ?
Il va falloir que j'apprenne à les pêcher !!!*



Et à t'adapter, si tu y arrives. Mais si nous continuons sur cette ligne (si j'ose dire !), il n'y a pas que les phoques ou les saumons qui disparaîtront. L'adaptation n'est possible que si on lui laisse le temps.

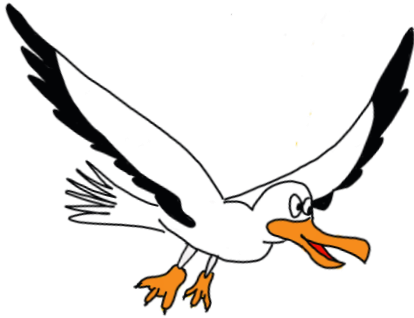


Non, non, arrête Eifel ! Je ne peux pas y croire!
Ça fait trop peur...
Et si tout ça n'était qu'une « théorie » ?

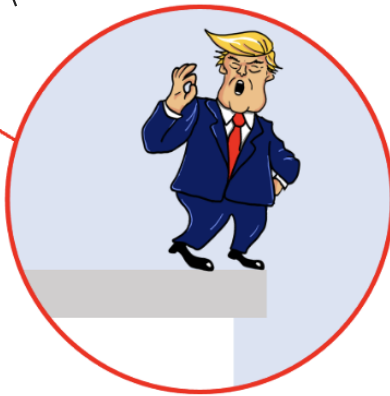


Ça t'arrangerait bien de le croire, Ours !
Mais souviens toi qu'en Science, il ne s'agit pas
de croire ou de ne pas croire.
On n'annonce que ce qu'on a scrupuleusement
observé ou rigoureusement démontré,
que ça fasse plaisir ou non !
Le reste n'est qu'hypothèses, suppositions
ou balivernes !

Pourtant, j'ai vu un jour un drôle de type qui essayait de voler (oui, de voler !), et qui n'avait pas l'air de croire à une théorie que tu m'avais déjà expliquée et qui est vérifiée et démontrée depuis bien longtemps, la gravitation de Newton je crois.



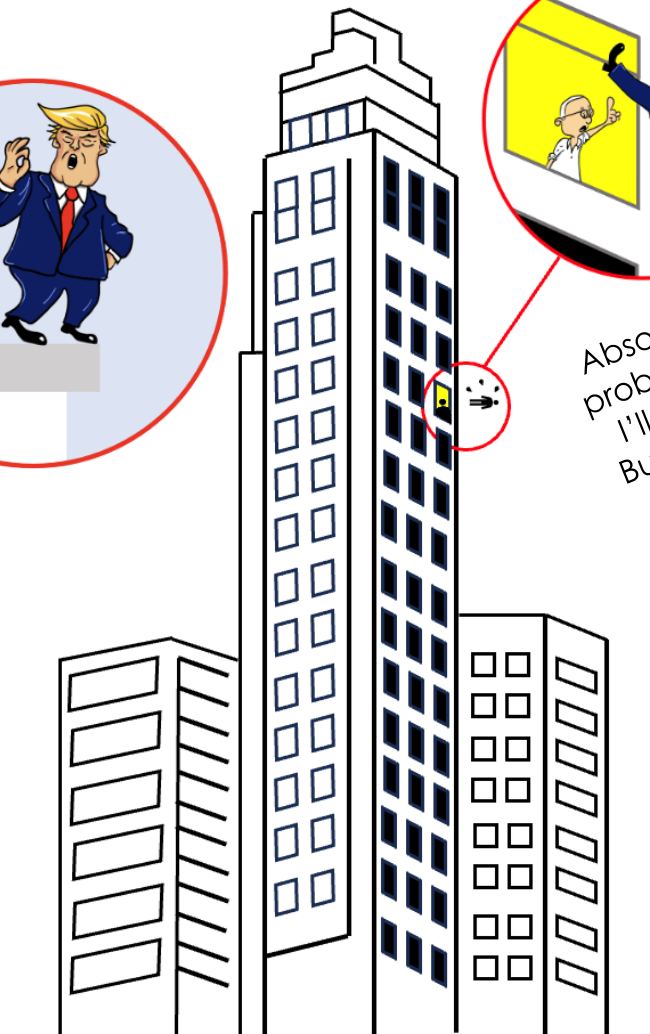
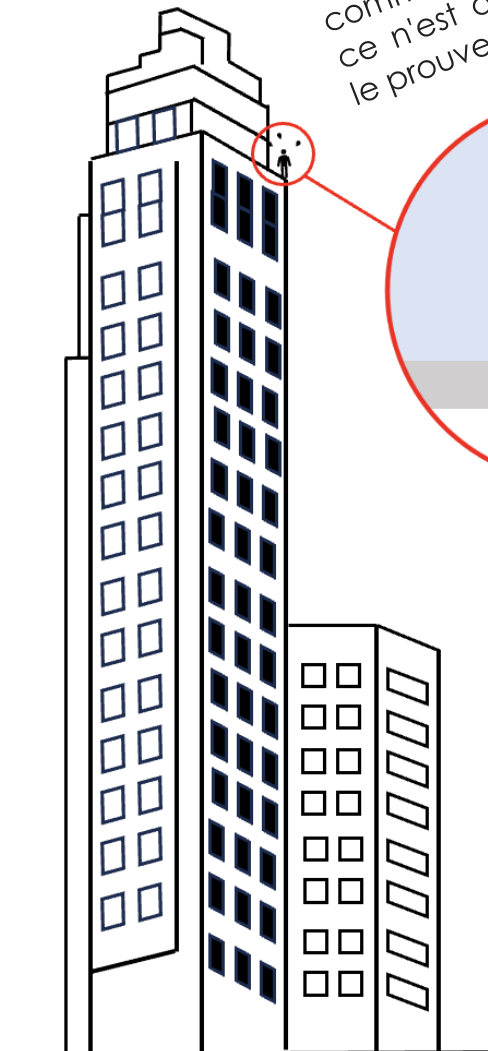
Pfff ... Tout ça c'est comme la gravitation, ... ce n'est que théorie. Je le prouve !



Ohé, ça va ?

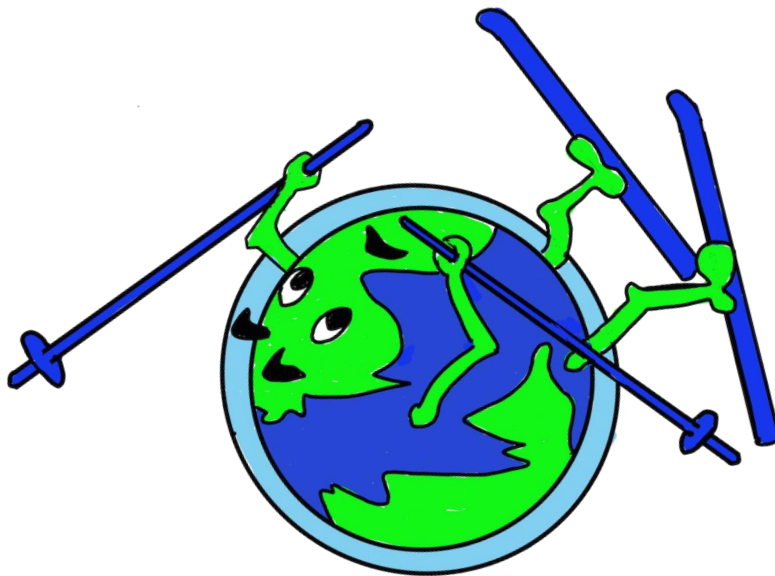


Absolutely no problem so far. I'll make my Business great again !

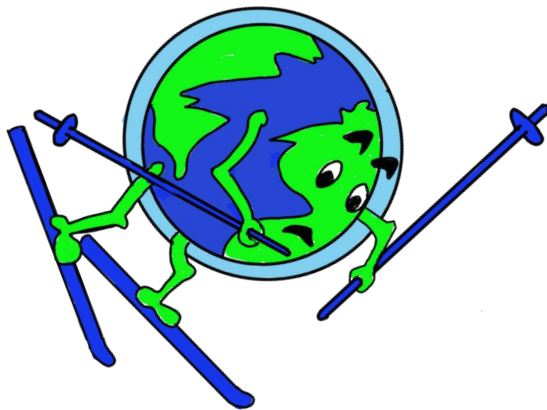




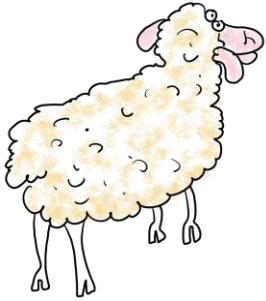
Oui, certaines personnes ont du mal à croire à ce qui leur fait peur, ou à ce qui touche à leur porte-monnaie (ou à leur compte aux Bahamas). J'espère que l'Humanité n'en est pas au même point, prête à faire encore un pas de plus dans le vide en espérant pouvoir faire marche arrière si besoin.



**Et maintenant
que peut-on faire?**



Oui, c'est une bonne question.
Que peut-on faire maintenant?
N'est-il pas trop tard?



Qu'en penses tu, Eiffel?



Ben... Vaste question en effet!
Si vous voulez VRAIMENT en savoir plus...
... vous trouverez la suite de l'histoire
en allant sur le site amazon.fr
(147 pages en tout).



Une fois sur amazon.fr, il suffit de taper:
Louchet Castel Climat
Bonne lecture!

Et ensuite, ce sera à vous de jouer.

C'est urgent, faites le savoir, agissez, faites
bouger les choses avant qu'il ne soit trop tard.
Gaia commence à avoir vraiment trop chaud
sous les spatules... Elle compte sur

VOUS !



Encore une BD sur le climat, vous direz-vous !!! Pourtant, tout le monde (ou presque) sait bien que ça chauffe. Tout le monde (ou presque) sait bien que ça s'accélère ! Tout le monde (ou presque) sait bien ce qu'il faudrait faire (ou ne plus faire) pour juguler cette évolution d'ici 2050, ou même la fin du siècle ! Alors, à quoi bon ? Y aurait-il du neuf sous le Soleil ?

... Et ... Oh non, pardon, cette fois-ci ... il a cassé ! Qui aurait pu prévoir ? Et imaginez qu'il en soit de même pour le climat ! Comment savoir ? Pour cela, il faut totalement changer de point de vue.

Eh bien oui, il y a du neuf sous le soleil, et c'est le cas de le dire ! Avez-vous déjà tiré de plus en plus fort sur un élastique sans qu'à la fin il ne vous claque entre les doigts ? Pourtant, les lois de l'élasticité prévoient que si vous tirez 2 fois plus fort, il s'allongera 2 fois plus. Si vous tirez 3 fois plus fort, il s'allongera 3 fois plus, et ainsi de suite. Et ...



Sautera ?
Sautera pas ?

