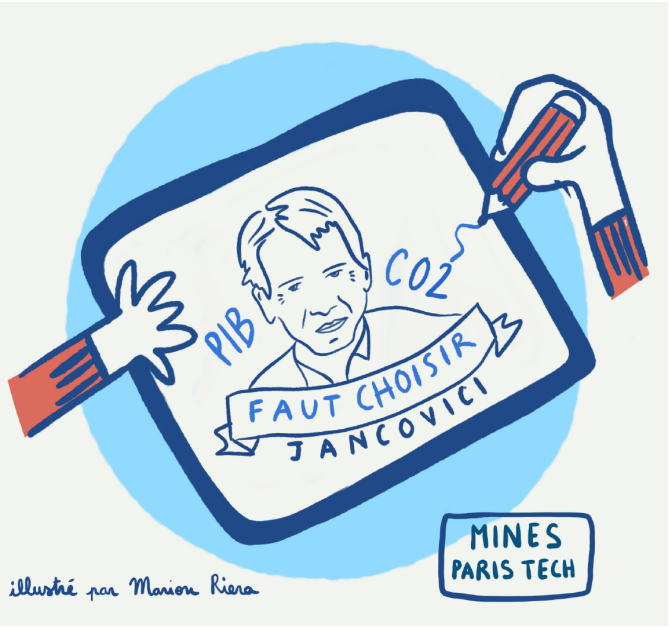
Transcription des cours magistraux de

Jean-Marc Jancovici

Éléments de base sur l'énergie au XXIe siècle
Partie 3 – Le changement climatique (1)



Cours magistraux dispensés à MINES ParisTech
Année scolaire 2018 – 2019

The Shifters, 2019.

AVERTISSEMENT

Ce document a été réalisé par les membres de l'association de loi 1901 The Shifters au cours du second semestre 2019.

Il contient une transcription écrite d'une des interventions filmées de Jean-Marc Jancovici à MINES ParisTech au cours de l'année scolaire 2018-2019.

Cette transcription a été réalisée dans le but d'être la plus fidèle possible aux propos tenus par l'orateur lors de son intervention. Cependant, comme toute transcription écrite de propos tenus oralement, celle-ci est nécessairement imparfaite, et certains éléments du discours original ont été supprimés ou révisés – quoique de façon marginale – afin d'obtenir un texte plus fluide.

L'intervention filmée originale est consultable à l'URL suivante:

https://www.youtube.com/watch?v=l8pdSClyRds

Ce document est placé sous license CC-BY-NC-SA. Il est librement distribuable, sauf à des fins commerciales. Dans le cas où ce document servirait à produire des créations dérivées, il convient aux auteurs de ces créations dérivées de faire mention de la provenance du présent document et de placer ces créations dérivées également sous licence CC-BY-NC-SA.

Table des matières

1 Nous avons un problème de climat ? Meuh non, c'est réglé ! . . . 1
2 Tu causes, tu causes 3
3 Attention : le climat, ce n'est pas la météo ! 6
4 Aglagla... et le climat se réchauffe ? 9
5 Une série exacte peut être mal interprétée... 11
6 Que des hommes pour tripoter le climat ? Allons donc... 12
7 Être perturbé concerne aussi les planètes 15
8 Je gèle et je déglace 17
9 L'effet de serre 19
10 Climatologue, cela n'existe (presque) pas ! 24
11 L'effet de serre est de l'histoire (scientifique) très ancienne 26
12 Vous avez dit gaz à effet de serre ? 29
13 Origine de l'effet de serre « naturel » : que d'eau ! 31
14 La Terre n'a pas le monopole de l'effet de serre 32
15 L'Homme, agent climatique 34
16 Plus ça va (le PIB) et moins ça va (le CO_2) 38
17 Plus de PIB avec moins de CO_2 40
18 En France aussi, plus ça va et moins ça va 42
19 Vivent le charbon, le PIB et les enfants ! 43
20 La déforestation, historiquement la première source 45
21 Et les émissions de CO_2 par personne, ça donne quoi ? 48
22 Et en France ? (1/3) 50
23 Et en France ? (2/3) 52
24 Et en France ? (3/3) 54
25 Une partie de ce CO_2 se trouve très bien dans l'air 55
26 Les gaz à effet de serre aiment s'envoyer en l'air... et y rester . . . 58
27 Les gaz à effet de serre aiment s'envoyer en l'air... et y rester . . . 62
28 Pour savoir ce qui s'est passé, il faut fouiller les archives 63
29 Allons à la neige (ou plutôt à la glace) 65
30 J'fais des trous, des p'tits trous 66
31 Le glaçon peut coûter cher ... mais rapporter gros 67
32 Émettons, émettons, il en restera toujours quelque chose 69

33 Plus ou moins de CO_2, c'est naturel aussi 72
34 Comparer les gaz, comment on fait ? 74
35 Vaches qui rotent et pètent émettent tripette 77
36 Un gaz hilarant qui ne l'est plus tellement 79
37 Chaîne du froid et mauvaises odeurs sous le bras. 81
38 Ozone des villes et ozone d'en haut 83
39 Et tout cela s'accumule aussi dans l'atmosphère 85
40 Bref, l'ensemble donne quoi ? 87
41 Et quid de la Gaule ? 91
42 Dis-moi ce que tu émets, je te dirai si tu consommes 92

1. Nous avons un problème de climat ? Meuh non, c'est réglé !

Diapositive 2.

Alors, aujourd'hui on va parler de climat. Qui connaît le monsieur qui est à droite là ? Pas plus de personnes ? Une dizaine, ou une quinzaine de personnes le connaît ? Qui sait ce qu'il faisait à ce moment-là ?

∗ ∗ ∗ Marmonnement auditoire ∗ ∗ ∗

Très bien. Et son nom est ?

∗ ∗ ∗ Marmonnement auditoire ∗ ∗ ∗

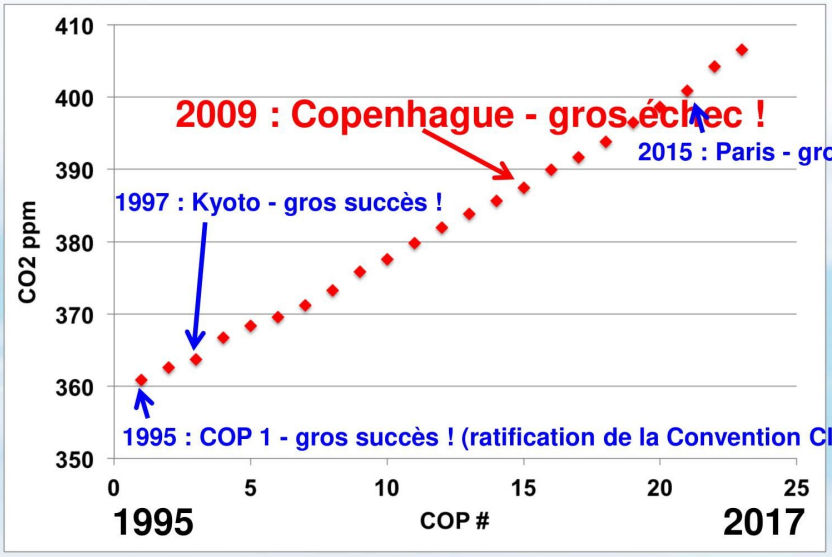
Laurent Fabius absolument, ancien Premier Ministre de la France.

Alors monsieur Laurent Fabius, en décembre 2015 abat, tel un commissaire-priseur, son marteau sur le pupitre et déclare accepter ou approuver l'accord de Paris qui dit que les pays signataires vont faire leurs meilleurs efforts pour que l'élévation de la température reste bien en dessous de 2 °C.

Donc si cet accord avait une portée effective, pratique, je pourrais remplacer ce cours par une grande récréation en vous disant que le problème est réglé et que ce n'est pas la peine de vous enquiquiner en vous expliquant de quoi il retourne avec le problème puisque le problème est réglé.

Malheureusement, il va quand même falloir deux heures et demie pour vous expliquer que le problème est très, très loin d'être réglé et qu'il y a encore un petit peu de chemin entre la coupe et les lèvres.

2. Tu causes, tu causes …



Concentration atmosphérique en CO_2 mesurée à chaque Conférence des Parties. Jancovici, d'après données NOAA ESRL.

Diapositive 3.

Vous avez ici une courbe de la concentration atmosphérique en CO_2 exprimée en millionièmes.

Donc on exprime la concentration atmosphérique en CO_2 en général – je vais revenir longuement sur ce que c'est le CO_2 et d'où il sort etc. – mais qui est exprimée en partie par volume, c'est-à-dire la fraction molaire de l'atmosphère – exprimée en volume – qui est composée de CO_2. Ce sont des millionièmes. [*NDT :* la concentration atmosphérique en CO_2 est souvent exprimée en *parties par millions en volume* (ppmv). 1 ppmv = 1 $\mu L\,L^{-1}$.]

Donc quand vous avez sur ce graphique 300 ppm – soit 300 millionièmes – ça fait 0,03 %, c'est aussi comme ça que vous pouvez regarder.

Et au lieu de graduer en fonction des années (par exemple cette année correspond à 1995 et cette année correspond à 2017), j'ai gradué en fonction du numéro de la réunion annuelle de la Conférence des Parties de la Convention Climat.

2. *TU CAUSES, TU CAUSES…*

La Convention Climat – j'y reviendrai aussi pendant ce cours et le suivant – c'est l'accord onusien que tous les pays de la planète ont signé puis ratifié en disant qu'on allait s'occuper de vous (c'est-à-dire des générations futures) puisque ça a été signé en 1992. Et je pense qu'en 1992, il n'y avait pas grand monde dans cette salle qui était déjà né.

Donc les générations futures, c'est vous, et dans ce papier on a dit qu'on allait s'occuper des générations futures.

Alors c'est signé en 1992 et ratifié en 1995. Donc en 1995, c'est un grand succès puisque la Convention Climat qui dit qu'on va s'occuper de vous entre en vigueur, et il y a la première réunion annuelle de la Conférence des Parties. Alors ce qu'on appelle la Conférence des Parties, ce ne sont pas des bouchers qui se réunissent pour discuter des bons morceaux du bœuf, non. La Conférence des Parties, c'est la réunion annuelle des Parties à la Convention, parce que dans le jargon onusien un pays qui signe ou qui ratifie une Convention s'appelle une Partie, voilà c'est comme ça. Donc les parties à la Convention sont les pays ou les entités – l'Union Européenne par exemple – qui ont ratifié la Convention.

— Donc Année 1 de la vie de cette Convention qui entre en vigueur 1995 : grand succès évidemment.

— 1997 : c'est l'année du Protocole de Kyoto qui est – je n'y reviendrai pas en détail – une annexe à la Convention Climat dans laquelle on dit : « Voilà, il y a un certain nombre de pays dans le monde qui vont prendre des engagements quantitatifs de réductions, dont la France. » Donc la France a dit « les émissions qui viennent de chez moi vont baisser de 5 % entre telle année et telle année » et un certain nombre d'autres pays ont pris exactement le même genre d'engagements. Alors vous voyez l'effet que ça a eu sur la concentration atmosphérique par la suite…

— Arrive Copenhague, qualifiée d'énorme échec… Bon.

— Arrive Paris, qualifiée d'énorme succès… On verra.

Donc cette petite entrée en matière est là pour vous montrer que malheureusement – et on le verra sur un certain nombre d'autres courbes que je vais vous montrer – jusqu'à maintenant, la quantité de bruit fait sur le changement climatique est un paramètre qui n'a pas d'influence sur ce qui se passe vraiment.

Il y a deux processus décorrélés dans le monde, qui sont :

— ce qui se passe vraiment au niveau des émissions et des processus climatiques qui en découlent ;

— la quantité de gens qui disent qu'il faudrait faire quelque chose.

Voilà, ce sont deux processus pour le moment totalement distincts malheureusement.

3. Attention : le climat, ce n'est pas la météo !

Avec nos sens, nous ne percevons que la météo. La météo, c'est le temps qu'il fait « tout de suite et devant ma porte ». Elle concerne des valeurs instantanées et locales de la température, des précipitations, de la pression, de la nébulosité, etc.

Par contre, le climat désigne des conditions moyennes de température ou de précipitations, et leurs variations les plus régulières (saisons par ex.), sur une zone plus ou moins vaste.

La confusion est possible parce que le climat utilise les mêmes grandeurs que la météo : température, précipitations, vent, nébulosité, etc.

Le climat change (et a toujours changé), mais pas aussi vite que la météo !

Diapositive 4.

On va parler de climat, et, en parlant de climat je vais insister – même pour les cervelles bien faites que vous êtes – car nous allons parler de quelque chose qui est inaccessible à vos sens.

Vous avez beau être de TRÈS brillants élèves-ingénieurs sélectionnés pour entrer dans une école TRÈS difficile d'accès, vous restez des animaux (comme moi), et donc vous faites confiance à vos sens. Parce que l'espèce humaine est une espèce qui fait confiance à ses sens.

Donc, on date d'une époque où c'étaient nos sens qui nous disaient qu'il fallait courir pour échapper au tigre à dents de sabre qui ne pensait qu'à faire son quatre-heures avec nous. Donc on connaît les choses que nos sens nous indiquent dans notre environnement immédiat.

En ce qui concerne les paramètres climatiques, ce que nos sens savent nous indiquer dans notre environnement immédiat, c'est :

— la température qu'il fait tout de suite là où on est ;

— éventuellement les précipitations qu'il y a tout de suite là où on est ;

— la luminosité qu'il y a tout de suite là où on est ;

— la nébulosité – c'est à dire les nuages – qu'il y a tout de suite là où on est ;

— le vent qu'il y a tout de suite là où on est ;

— etc.

Ces paramètres-là, appréciés de façon locale et instantanée, en sciences, ça conduit à ce qu'on appelle la météo. Donc la météo, c'est l'évolution instantanée et locale (ou dans un avenir très proche) de choses qui parlent à nos sens – c'est-à-dire les conditions qu'il va faire ici.

Ce matin, pour savoir si je mettais un manteau ou pas, j'ai regardé la météo qu'il allait faire à Paris et je me fiche comme de l'an quarante de savoir quelle est la météo aujourd'hui à Buenos Aires. Voilà, ça ne m'intéresse pas. Tout ce qui m'intéresse pour savoir si je mets un manteau ou pas, c'est la météo qu'il va faire à Paris.

Alors le climat *a contrario* – dont on va parler maintenant – est quelque chose qui est inaccessible à vos sens, en tout cas de façon directe. Il l'est de façon indirecte mais il est inaccessible de façon directe parce que quand on parle de climat, on va parler de moyennes. Or une moyenne – vous le savez comme moi – c'est une construction intellectuelle.

C'est une série ou une intégrale, donc ce n'est pas un truc que vous observez dans la nature. C'est une construction intellectuelle, une moyenne. Or c'est cette construction intellectuelle qui va permettre de comprendre si oui ou non, on est en train de dériver hors normes par rapport à quelque chose qui est notre environnement habituel.

Alors vous voyez quand même des manifestations indirectes du climat dans le monde qui nous entoure. Par exemple, dans les manifestations indirectes, il y a la végétation.

Manifestement, la végétation qu'il y a au Groenland – il n'y en a pas beaucoup –, la végétation qu'il y a en Afrique, et la végétation qu'il y a sur le pourtour du bassin méditerranéen ne sont pas les mêmes. Parce que le climat n'est pas le même.

Donc des manifestations indirectes du climat, vous en voyez. Mais des manifestations directes, c'est-à-dire approcher une moyenne par ses sens, on n'y arrive pas.

3. *ATTENTION : LE CLIMAT, CE N'EST PAS LA MÉTÉO !*

Alors il y a une confusion qui vient de ce que dans un cas comme dans l'autre, on manipule les mêmes critères. C'est-à-dire que ce sont les mêmes variables qu'on manipule, mais dans un cas on va regarder des valeurs instantanées et locales, et dans l'autre cas on va regarder des moyennes spatiales, ou temporelles, ou les deux, et les variations régulières de ces moyennes. Par exemple, la variation saisonnière fait partie du climat.

Vous avez des variations saisonnières :

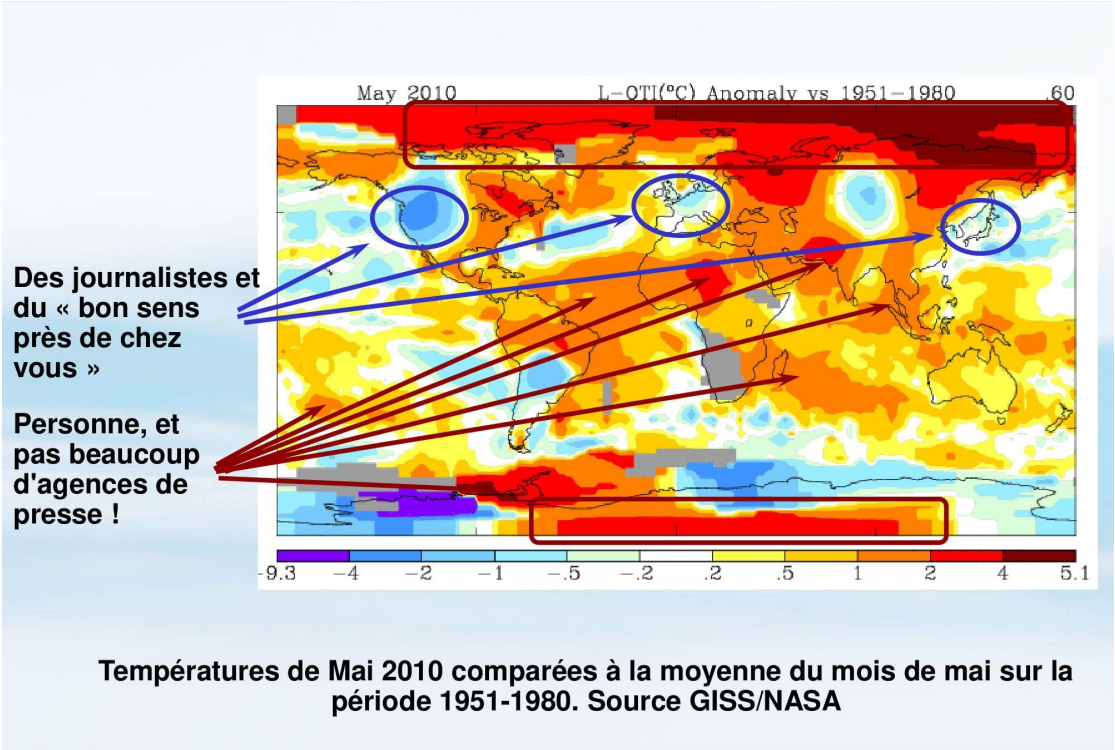
— qui concernent la température : ça ce sont les moyennes latitudes ;

— qui concernent éventuellement le fait qu'il y ait du soleil : ça ce sont les pôles ;

— ou qui concernent le fait qu'il y ait beaucoup de pluie ou peu de pluie : ça ce sont plutôt les régions équatoriales.

Donc vous avez des variations saisonnières qui ne sont pas toujours les mêmes où que vous alliez.

4. Aglagla… et le climat se réchauffe ?



Diapositive 5.

Alors je vais retaper sur mes ennemis préférés – à savoir les journalistes – et je vais vous donner là un exemple de quelque chose qui s'est produit il y a quelques années, que j'avais trouvé intéressant.

Il y avait eu un moment un article dans le journal (comme il y en a de temps en temps avec des gens qui veulent se rendre intéressants) en disant : « Regardez, il ne peut pas y avoir de réchauffement climatique parce que la planète en ce moment, ça ne se réchauffe pas : il fait froid. »

Alors voilà un jour où il se trouve que le hasard a fait qu'il y a eu des anomalies négatives (c'est-à-dire des températures plus fraîches que la moyenne) dans tout un tas d'endroits fortement peuplés. Vous voyez : un bout d'Europe, un bout des États-Unis, un bout du Japon, etc.

Or il se trouve que là où il y a des hommes, il y a des agences de presse et il y a des gens pour envoyer des communiqués de presse. Donc il y a des tas de gens qui disent : « Regardez, là où je suis là, aujourd'hui là, tout de suite, il fait froid. »

Sauf qu'au même moment : ni les pingouins, ni les dauphins au milieu de l'Atlantique, ni tous ces gens-là n'ont pu dire : « Ah mais vous savez, chez nous en ce moment il fait beaucoup plus chaud que la moyenne. »

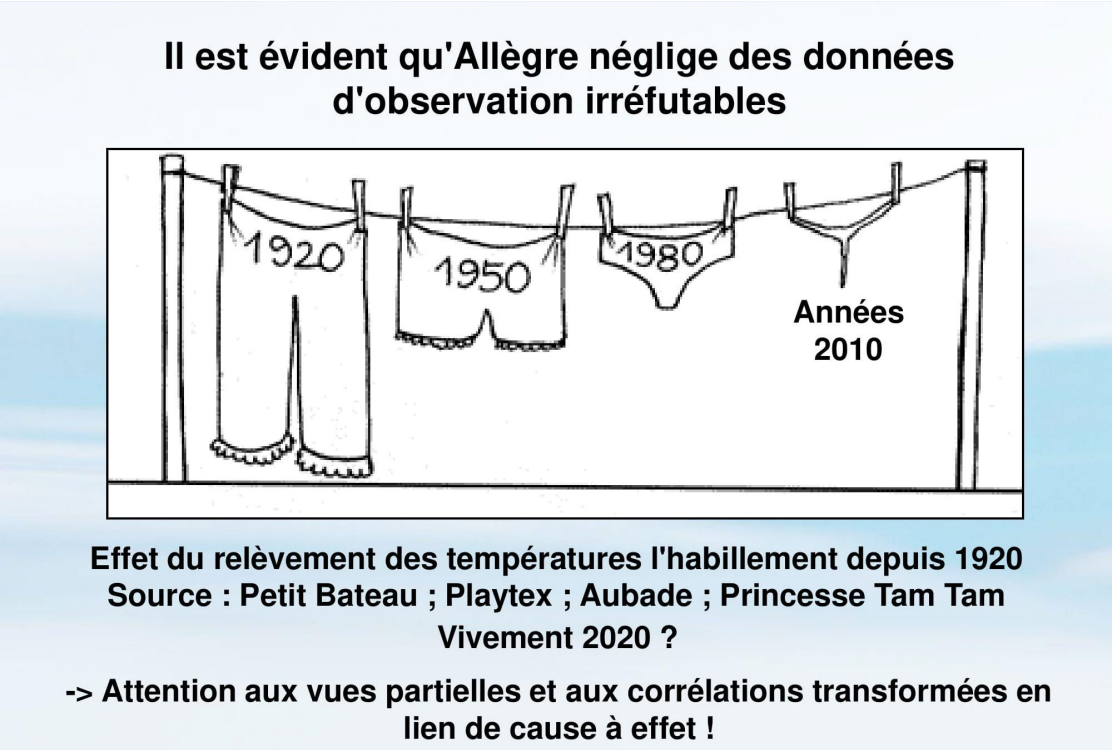
Donc si vous faites vraiment une moyenne avec là où il fait plus froid et là où il fait plus chaud, il n'y a pas de problème, la moyenne de l'ensemble de la surface planétaire est bien au-dessus de sa valeur de référence.

Et ça, ça continue de temps en temps.

C'est plus rare maintenant mais enfin, il continue à y avoir quelques personnes qui jouent à ce genre de petits jeux. C'est assez facile encore une fois en faisant la confusion entre une valeur instantanée et une moyenne : ça ne tient qu'à ça.

Et c'est très facile (encore une fois) d'abuser les gens qui ne sont pas familiers du sujet parce que ce sont les mêmes paramètres et parce que nos sens ne nous disent pas ce que c'est qu'une moyenne.

5. Une série exacte peut être mal interprétée…



Diapositive 6.

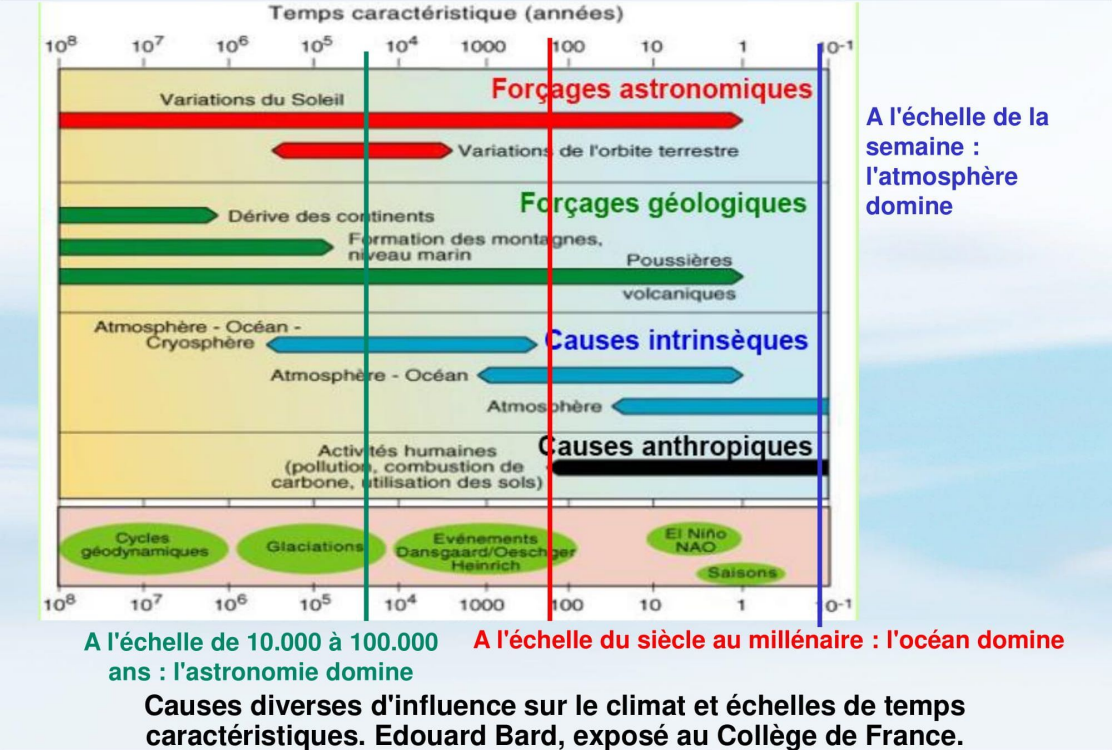
Il y a un autre travers qui est assez classique – il faut que je change l'année tous les ans, mais bon c'est toujours le même principe – quand on s'intéresse à ce sujet-là, c'est de mal interpréter une série.

Donc là, je pourrais dire que l'effet de ce processus, c'est le relèvement des températures. Je pourrais aussi dire que c'est la baisse du nombre de bateaux de pirates parce que de fait, les sous-vêtements ont diminué en même temps que le nombre de bateaux de pirates a baissé.

Enfin voilà, c'est très facile de faire une mauvaise interprétation de ce qu'on est en train d'observer tant qu'on n'a pas compris les processus.

Du coup, c'est très facile d'avoir une mauvaise conclusion.

6. Que des hommes pour tripoter le climat ? Allons donc…



Diapositive 7.

Le climat c'est donc des valeurs moyennes géographiques, enfin spatiales et temporelles. Mais même ces moyennes sont amenées à changer.

En fait, le climat de la Terre depuis que la Terre existe n'a jamais été stable sur des périodes géologiques. Alors la période géologique on s'en fiche un peu quand on est un homme ou une femme parce que votre espérance de vie, si tout va bien, est de l'ordre de grandeur du siècle – même si tout va mal, de quelques décennies – enfin je vous le souhaite. Donc ce qui se passe sur quelques millions d'années : prrrrt.

Mais la Terre est passée par des époques très, très contrastées en ce qui concerne son climat.

Par exemple il y a eu une époque où il n'y avait pas d'oxygène dans l'atmosphère terrestre : où l'atmosphère terrestre était composée essentiellement de CO_2, puis de méthane et d'azote.

Il y a eu des époques où la Terre était probablement quasiment totalement englacée : la calotte couvrait la quasi-totalité de la Terre.

Il y a eu une époque où il n'y avait pas de continent. Enfin bref : la Terre est passée par des états extrêmement variés, et si on regarde les quelques derniers millions d'années – c'est-à-dire l'ère quaternaire – il y a eu, même à ce moment-là, des grandes oscillations climatiques qui sont les glaciations / déglaciations.

Donc le climat n'est pas du tout resté stable.

Si on se place à des échelles de temps qui sont le million d'années ou moins, on a un premier facteur de forçage qui s'appelle le forçage astronomique. Alors le forçage astronomique vient du fait que le système solaire c'est un ménage à 10, et pas un ménage à 2. Et donc la Terre subit l'attraction des grosses planètes du système solaire. Donc on n'est pas dans une ellipse parfaite, régulière au cours du temps, qui est celle que vous savez calculer en géométrie avec juste deux corps. On est dans un système à dix corps : ça marche moins bien. En tout cas ce n'est pas régulier. Donc il y a des variations de l'orbite – je vais y venir juste après – et ça peut déformer le système climatique sur des échelles de temps qui sont de l'ordre de la centaine de milliers d'années.

Les continents ne sont pas toujours là où ils sont : il y a une dérive, comme vous le savez, des continents. Et en fonction de l'endroit où est un continent, eh bien la réflexion de la lumière solaire est plus ou moins importante. Par exemple, quand vous avez des continents qui se rapprochent des pôles, vous pouvez avoir des calottes permanentes qui apparaissent : typiquement le Groenland. Et à ce moment vous créez une surface très réfléchissante : beaucoup plus réfléchissante que l'eau océanique qui se trouvait là avant. L'installation de la calotte antarctique sur le pôle Sud il y a quelques dizaines de millions d'années – alors j'ai lu 30 ici, 15 là, mais enfin l'ordre de grandeur est le même – a refroidi le climat planétaire de quelques degrés (à cause de la création de ce grand miroir qui évacue une partie du rayonnement solaire sans qu'il ait le temps de chauffer le sol).

Après vous avez des oscillations internes au compartiment fluide de l'atmosphère, et notamment des processus qui sont liées à la circulation océanique à large échelle, qui peuvent changer le climat sur des périodes de temps qui vont du siècle au millénaire. Et évidemment, vous avez la dynamique interne de l'atmosphère. Mais ça, ça change le climat sur des durées qui sont très, très courtes.

Et puis maintenant vous avez nous, tout en bas là : la cause anthropique. Donc *cocorico*, nous sommes devenus un agent climatique. Nous sommes devenus un agent qui force le système climatique.

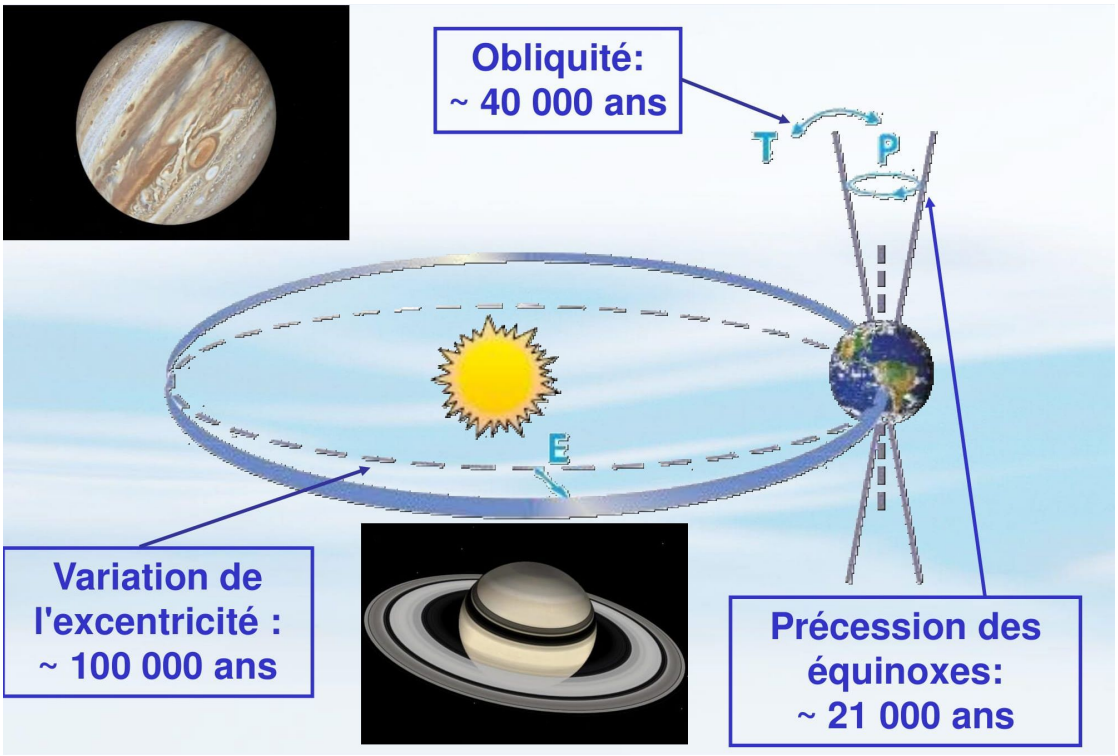
Quand vous faites de la météo – j'y reviens – le seul compartiment qui réagit à l'échelle de la journée, c'est l'atmosphère. Donc vous faites un bon modèle d'atmosphère : vous prenez vos copains (pas vous parce que vous ne savez pas faire, mais vos copains de SUPAERO, eux ils savent faire) et vous les envoyez à Météo France, vous leur demandez de faire un modèle de climat, et ils vous prévoient correctement la météo.

Par contre, si vous voulez regarder comment évolue le système à l'échelle du siècle – ce dont on va parler maintenant – ça ne suffit plus de faire un bon modèle atmosphérique. Ça ne suffit pas.

Il faut savoir modéliser l'évolution, à ces échelles de temps, d'autres compartiments de la planète, et en particulier de l'océan. L'océan c'est *le* compartiment fluide qui pilote l'évolution du système climatique à l'échelle du siècle. Beaucoup plus que l'atmosphère. Donc si vous voulez faire un bon modèle météo vous levez le nez, si vous voulez faire un bon modèle de climat, au contraire, vous baissez la tête.

À des échelles de temps encore plus longues, comme je le disais, ce sont les paramètres astronomiques qui dominent.

7. Être perturbé concerne aussi les planètes



Diapositive 8.

Alors ces paramètres astronomiques, quelles sont leurs variations ?

Tout d'abord, à cause de l'attraction des grosses planètes du système solaire, vous avez trois paramètres qui vont varier au cours du temps.

— Le premier c'est que la Terre ne fait pas une ellipse exacte puisque ça se déforme. C'est une quasi-ellipse dont l'excentricité est plus ou moins grande avec une quasi-périodicité de cent mille ans. Ça c'est une première variation qui est introduite par l'attraction des grosses planètes.

— La deuxième variation qui est introduite par les grosses planètes, c'est que vous avez l'axe de rotation de la Terre qui est plus ou moins incliné sur le plan de l'orbite. Vous comprenez que... Si l'axe de rotation de la Terre était totalement perpendiculaire au plan de l'orbite, aurait-on des saisons ?

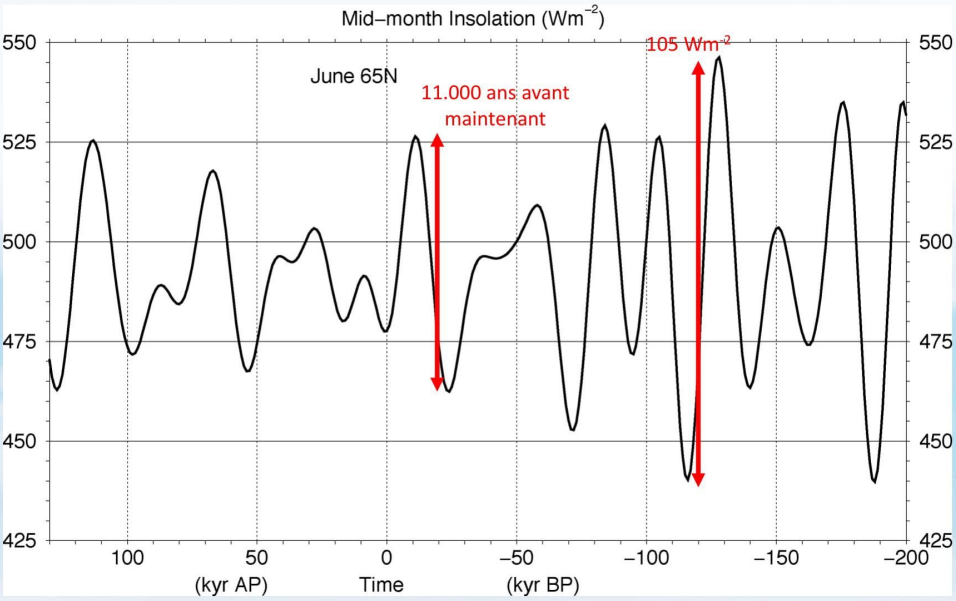
  Non, on n'aurait pas de saison. Vous êtes d'accord ?

Parce que l'inclinaison solaire serait toujours la même toute l'année. Donc la quantité de chaleur récupérée à une latitude donnée serait toujours la même toute l'année. Soit dit en passant, climat vient du mot grec « klima » qui veut dire « inclinaison ».

Par contre quand vous avez une inclinaison extrêmement prononcée, selon la période de l'année où vous êtes, vous avez la tête au chaud ou les fesses au froid (ou l'inverse). Et donc vous avez un très gros contraste entre les saisons. Donc plus l'axe se rapproche du plan de l'orbite et plus vous avez un contraste important entre les saisons. Et en particulier à ce moment-là, vous pouvez avoir des étés plus chauds et des hivers plus froids quand vous vous rapprochez des moyennes latitudes.

— Et enfin la dernière chose qui se passe, c'est que vous avez l'axe – comme une toupie – de rotation de la Terre qui tourne autour de la perpendiculaire au plan de l'orbite. Ce qui veut dire que comme vous avez un apogée et un périgée, eh bien vous montrez alternativement la tête ou les fesses (c'est-à-dire l'hémisphère Nord ou l'hémisphère Sud) au plus près ou au plus loin du soleil. Donc avec une quasi-périodicité de vingt mille ans, vous avez plutôt l'hémisphère Nord quand vous êtes au plus près du soleil, qui regarde le soleil. Ou plutôt l'hémisphère Sud. D'accord ? Soit l'un, soit l'autre. Et ça, ça change avec une quasi-périodicité de 20 mille ans.

8. Je gèle et je déglace



Variation de l'insolation en juin à 65° N. Source André Berger, exposé au Collège de France, 2004

Diapositive 9.

Quand vous mettez tout ça bout-à-bout, vous avez notamment quelque chose qui varie de manière forte, c'est l'insolation à 65° Nord. Alors vous allez me dire « l'insolation à 65° Nord, pourquoi on s'y intéresse tout d'un coup ? »

Alors pourquoi ?

— Parce que c'est la zone très sensible qui conditionne les entrées en glaciation ou les sorties de glaciation pendant l'ère quaternaire.

— Parce que c'est un endroit où, avec les variations de ces paramètres astronomiques, vous pouvez avoir une variation très importante de l'insolation qui est reçue, en particulier en été.

Plus l'axe se redresse et moins il y a de contraste entre les saisons, et donc à ce moment, l'été est proportionnellement moins chaud. Et, quand vous êtes suffisamment près des pôles pour qu'il neige quand même l'hiver, à ce moment, vous avez la neige qui n'a plus envie de beaucoup fondre l'été.

8. JE GÈLE ET JE DÉGLACE

La neige se met à s'accumuler année après année et vous entrez en glaciation.

Donc en fait, une des conditions de l'entrée en glaciation c'est que l'axe se redresse sur le plan de l'orbite. Et corrélativement, quand il s'incline c'est l'inverse, vous avez des étés très chauds, ça se met à fondre. Donc vous avez ici des variations de l'insolation qui vont avec les entrées et les sorties de la dernière glaciation qui sont illustrées ici.

Dans tous ces paramètres, il y en a un qui aujourd'hui est devenu le paramètre dominant. Alors il va falloir que je m'interrompe 30 secondes pour retrouver la petite animation qui va bien.

9. L'effet de serre

Diapositive 10.

Voilà, ici vous avez une petite animation faite par les seules personnes sérieuses qui comptent dans ce monde, c'est-à-dire les producteurs de Champagne [*NDT :* diapositive animée lors du cours magistral]. En plus c'est vrai, ils m'ont fait cette petite animation en 2002 pour une conférence, qui essaie d'expliquer en quoi consiste la dynamique de l'effet de serre, qui est un des processus à l'œuvre en ce qui concerne la formation du climat.

Alors vous avez ici une illustration simplifiée de la surface terrestre constituée de sols émergés et d'eau (d'océans), et de l'apport énergétique qui permet à la machine climatique de fonctionner, c'est-à-dire de l'énergie solaire.

Puisque la machine climatique est comme toutes les machines au monde, elle est soumise à la première loi de la thermodynamique. Donc pour qu'elle fasse quelque chose, il lui faut de l'énergie, et cette énergie est essentiellement amenée par le rayonnement solaire. Alors ce rayonnement solaire, quand il arrive à la surface de l'atmosphère, vous en avez en gros un tiers qui est réfléchi vers l'espace par tout ce qui est brillant vu de l'espace.

Donc si vous regardez une photo satellite de la Terre, vous avez deux types de surfaces qui sont particulièrement brillantes qui sont ?

— La neige, ça vous allez trouver, et puis ?

— Les déserts, absolument.

Donc vous avez la neige et les déserts qui sont particulièrement réfléchissants. Ça, ça vous évacue à peu près un tiers de l'énergie solaire incidente. Les deux tiers restants, puisqu'ils ne sont pas réfléchis, sont absorbés, notamment par le sol. Alors le sol, comme dans tout système énergétique, va récupérer de l'énergie qui est celle qu'il absorbe sous forme de rayonnement lumineux, enfin de rayonnement électromagnétique pour être plus précis.

Parce qu'on va dire que 50 % du rayonnement solaire, c'est de l'infrarouge proche : il y a que 40 % de visible et 10 % d'ultraviolets.

Donc le sol absorbant l'énergie solaire va chercher à se mettre à l'équilibre énergétique lui aussi. Et le sol a trois manières de se mettre à l'équilibre énergétique, c'est-à-dire de restituer en régime stationnaire l'énergie que lui a fourni le soleil.

— La première manière qu'il a, c'est de la chaleur de contact. Donc vous êtes au-dessus d'un sol chaud, vous mettez de l'air dessus, la chaleur se transfère directement par contact. C'est une première manière dont le sol restitue de l'énergie.

— Une deuxième manière dont le sol restitue de l'énergie – alors ce n'est pas très bien représenté mais vous le voyez quand même là avec cette espèce de petit truc flashy bleu là – c'est la chaleur latente de l'eau : évaporation-condensation. Donc, quand vous chauffez le sol, qui se trouve être aux deux tiers de l'eau – parce que les deux tiers de la planète sont couverts d'eau – eh bien vous allez évaporer de l'eau. Et là, vous avez de la chaleur latente qui est utilisée pour l'évaporation restituée dans l'atmosphère.

— Et vous allez avoir un troisième mode de restitution de l'énergie : le sol va rayonner de l'infrarouge. Parce que vous vous rappelez que tout corps au-dessus de 0 K rayonne quelque chose. Alors le soleil, qui en surface est à 6000 K, a un spectre dans lequel il y a beaucoup de rayonnement visible, beaucoup d'infrarouge proche, un peu d'ultraviolets. La Terre, qui est en moyenne à 300 K (en ordre de grandeur) – enfin un peu plus, 310 – a un spectre qui est beaucoup plus long (déplacé vers des longueurs d'onde qui sont beaucoup plus importantes). Et dans ces longueurs d'onde plus importantes, il y a essentiellement ce qu'on appelle de l'infrarouge lointain.

> Soit dit en passant, c'est à peu près le même rayonnement infrarouge que celui que vous émettez vous, et qui vous permet d'être vu avec une caméra infrarouge ou qui permet de regarder les infrarouges qui s'échappent de la passoire thermique dans laquelle vous habitez, si c'est le cas. Tout ça c'est dans les mêmes longueurs d'onde.

Et il se trouve que l'atmosphère, qui est parfaitement transparente au rayonnement solaire incident – à l'exception de ? Qu'est-ce qui ne passe pas à travers l'atmosphère ?

∗ ∗ ∗ Marmonnement auditoire ∗ ∗ ∗

Les ultraviolets. Qui sont interceptés par une espèce chimique que vous trouvez dans la stratosphère, qui s'appelle l'ozone. Eh bien, à l'exception de cette interception-là, l'essentiel du rayonnement solaire passe à travers l'atmosphère sans encombre. Alors que le rayonnement réémis par la planète – et il s'agit bien de *réémis*, pas *réfléchi* comme je le trouve parfois dans quelques copies – c'est de l'infrarouge lointain pour lequel l'atmosphère va comporter des espèces qui sont très fortement opaques. Et très fortement opaques, ça veut dire qui disposent de raies d'absorption dans l'infrarouge lointain.

Et en fait, un gaz à effet de serre, c'est ça sa définition : c'est un gaz qui possède des raies d'absorption dans l'infrarouge lointain émis par la planète. Comme l'atmosphère est essentiellement opaque à ces infrarouges, elle va absorber l'énergie de ces infrarouges.

Même motif, même punition : l'atmosphère va chercher elle-aussi à se mettre à l'équilibre énergétique. Et pour se débarrasser de l'énergie qu'elle absorbe quand elle est à l'équilibre énergétique, elle n'a qu'un seul moyen à sa disposition – elle ne peut pas évaporer de l'eau – tout ce qu'elle peut faire c'est rerayonner de l'infrarouge. Donc quand vous interceptez les infrarouges émis de la surface : vous les interceptez, vous les réémettez.

Mais vous allez en réémettre dans toutes les directions, donc une partie part vers l'espace et va finir par mettre la planète à l'équilibre énergétique (vu de l'espace). Mais une autre partie retourne au sol, et donc, contribue à un deuxième chauffage du sol après le chauffage direct du rayonnement solaire.

Alors en termes de watts par mètre carré, le rayonnement infrarouge issu de l'effet de serre est presque aussi important que le rayonnement solaire. Mais comme je ne sais plus qui a dit que $P = \sigma \times A \times T^4$, évidemment ça ne double pas la température d'équilibre du sol, mais ça l'augmente quand même de 30 °C. Donc si l'effet de serre naturel n'existait pas – bonne nouvelle pour vous – ce

cours n'aurait pas lieu. Mauvaise nouvelle : vous n'existeriez pas, parce que la Terre serait trop loin du point triple de l'eau pour que la vie ait pris place. En tout cas pas celle qu'on connaît.

Donc l'effet de serre naturel, c'est une très bonne chose : il a permis l'apparition de la vie et, soit dit en passant, par une espèce de magie de l'équilibre des processus, l'effet de serre naturel a baissé à mesure que la puissance solaire augmentait. Parce que depuis que l'étoile Soleil s'est formée, sa puissance a augmenté, et il y a eu une espèce d'évolution corrélative à la fois de l'effet de serre et de la puissance solaire, qui fait que la température de la planète ne s'est jamais beaucoup éloignée du point triple de l'eau. Enfin en dessous. Elle n'est jamais descendue sous le point triple de l'eau, partout. Donc voilà, c'est quelque chose d'assez remarquable.

Là-dessus, on arrive nous.

Alors on arrive nous, et l'histoire que je vous ai racontée au premier cours – c'est-à-dire on arrive nous, avec nos machines, nos vaches et nos un, puis deux, puis trois, puis cinq, puis sept, puis huit milliards de bipèdes. Ce faisant nous allons mettre en route des activités qui créent des émissions additionnelles de gaz à effet de serre. En fait, des émissions de gaz à effet de serre, la planète en fait toute seule aussi. Mais nous on en rajoute.

Et comme ces gaz à effet de serre ont la sale manie de ne pas vouloir s'évacuer rapidement de l'atmosphère une fois qu'on les y a mis – j'y reviendrai – eh bien à ce moment, nous allons augmenter la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre. Donc on va augmenter l'opacité de l'atmosphère au rayonnement infrarouge émis par la planète.

Si on augmente l'opacité de l'atmosphère au rayonnement infrarouge émis par la planète, on va intercepter encore mieux ce qui est émis par le sol, et de ce fait on va encore plus réchauffer la basse atmosphère, qui va encore plus réémettre dans tous les sens, dont vers le sol. Donc on va intensifier le chauffage du sol. Donc l'augmentation de l'effet de serre engendre une augmentation de la [*NDT :* température de la] surface planétaire.

Comme on augmente le chauffage du sol, le sol va faire ce qu'il savait faire avec le rayonnement solaire de départ, c'est-à-dire qu'il va augmenter tous les termes de restitution d'énergie du sol vers l'atmosphère. Donc on va augmenter la chaleur de contact, on va augmenter l'évaporation-condensation, et on va augmenter le rayonnement infrarouge émis. Et on va l'augmenter jusqu'à temps que ce qui arrive à passer à travers l'atmosphère – ce qu'on appelle la fenêtre atmosphérique – soit redevenu identique à ce qu'on avait avant d'augmenter les gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Dit autrement : on va revenir à l'équilibre énergétique vu de l'espace, mais dans l'intervalle on aura intensifié les flux d'énergie entre le sol et la basse atmosphère. Alors quand vous voyez cette petite animation…

∗ ∗ Question auditoire sur l'absorption des infrarouges par les GES ∗ ∗ ∗

Ils ne les retiennent pas : ils les absorbent. Ils les absorbent et ils les réémettent. C'est un phénomène d'absorption-réémission.

∗ ∗ ∗ Question auditoire sur les infrarouges solaires ∗ ∗ ∗

Les infrarouges qui viennent du soleil, ce sont des infrarouges de courte longueur d'onde, ce ne sont pas les mêmes, d'accord ? C'est ce qu'on appelle les infrarouges proches. Infrarouge, c'est tout ce qui va au-delà du visible. Donc ce n'est pas quelque chose qui est extrêmement précis.

Donc on a coutume de classifier en infrarouges proches ce qui est très proche du visible, dans les mêmes ordres de grandeur de longueur d'onde, et en infrarouges lointains ceux qui sont beaucoup plus loin.

Ce que vous comprenez tout de suite en regardant cette animation, c'est que les mouvements convectifs – ou plus exactement les phénomènes extrêmes qui trouvent leur origine dans des mouvements convectifs – vont faire quelque chose. Les phénomènes extrêmes qui trouvent leur origine dans les mouvements convectifs, vous avez les ouragans – vous savez qu'un ouragan, ça démarre par une convection importante avec une température de surface de l'océan qui doit être élevée pour que vous ayez beaucoup d'évaporation. Vous avez les orages. Vous avez les tornades. Et tous ces phénomènes, vous comprenez que le moteur va augmenter. Parce que la surface se réchauffe, l'évaporation augmente.

Mais corrélativement, comme une part croissante des infrarouges terrestres est absorbée près de la surface, il y en a moins pour réchauffer la stratosphère. En fait on va voir ça au prochain cours : une des marques de l'effet de serre, c'est que la température de surface augmente mais la température de la stratosphère diminue. Du coup, vous allez augmenter le gradient de température dans la basse couche de l'atmosphère – ce qu'on appelle la troposphère, les premiers 10 km – et si vous augmentez le gradient de température, vous augmenter la puissance convective. Donc vous allez nécessairement – à cause du processus-même qui est en cause – changer la dynamique des phénomènes extrêmes ou des phénomènes intenses sur le plan météorologique.

10. Climatologue, cela n'existe (presque) pas !

Pour cerner le comportement du climat, il faut une multitude de disciplines scientifiques, dont aucune ne s'appelle « climatologie » :

Astrophysiciens -> énergie solaire reçue par la Terre

Dynamiciens de l'atmosphère -> échanges surface-espace

Chimistes de l'atmosphère (aérologues) -> composition de l'air

Océanographes -> océan,

Glaciologues -> calottes polaires, paléoclimats,

Vulcanologues -> volcans,

Géophysiciens -> dérive des continents,

Biogéochimistes -> cycle des éléments (N, C, P, O…), paléoclimats

Biologistes -> végétation,

Sans parler de toutes les sciences humaines, puisque l'homme est devenu un agent climatique….

Diapositive 11.

Voilà, une fois que je vous ai expliqué ce qu'était l'effet de serre, pour comprendre la suite, il y a quelque chose qu'il faut que vous sachiez, c'est que comprendre l'évolution du climat sous l'effet des activités humaines, ça ne relève pas d'une seule discipline scientifique.

Dans la presse, on voit souvent traîner le terme de *climatologue*. Et alors quand on voit ça on se dit un climatologue, c'est un spécialiste de l'évolution du climat. En fait, « spécialiste de l'évolution du climat », ça n'existe pas en tant que tel. À aucun moment il y a eu des disciplines qui s'appelaient « spécialiste de l'évolution du climat sous l'effet des activités humaines ».

Ce qui s'est passé sur les trente dernières années, c'est qu'il y a une instance de mise en commun des compétences de tout un tas de gens qui s'est créée sous l'égide des Nations Unies, qui s'appelle le GIEC (ou IPCC en anglais, ce qui veut dire International Panel on Climate Change, et en français on traduit ça par Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat, GIEC), qui consiste à demander à des chercheurs de mettre bout-à-bout les trouvailles de tout un

tas de disciplines scientifiques pour donner une vision globale de ce problème qu'est l'évolution du climat sous l'effet des activités humaines.

Mais ça ne relève pas que d'une seule discipline scientifique :

— Alors par exemple, je vous ai dit que le climat planétaire changeait sous l'effet de l'attraction des planètes. Eh bien vous avez besoin d'astrophysiciens pour comprendre la mécanique céleste. Même sans autres planètes du reste, vous en avez besoin.

— Vous avez besoin de dynamiciens de l'atmosphère, ce ne sont pas les mêmes.

— Vous avez besoin de chimistes de l'atmosphère, ce ne sont pas les mêmes.

— Vous avez besoin d'océanographes, ce ne sont toujours pas les mêmes, etc.

Pour ceux d'entre vous par exemple qui ont entendu parler d'un homme qui s'appelle Jean Jouzel. Jean Jouzel est à ranger plutôt dans la catégorie des glaciologues. Il a fait sa thèse sur la teneur isotopique en oxygène 18 (si ma mémoire est bonne) dans les grêlons. Donc c'est de là qu'il est parti.

Donc vous avez besoin de tout un tas de spécialités et il a fallu un tour de force à la communauté scientifique pour demander à tous ces gens-là de se parler pour donner d'une seule voix – avec un guichet unique d'accès à l'information qui s'appelle le GIEC – une vision de ce qu'était l'évolution du climat sous les activités humaines.

Alors pourquoi est-ce que je vous dis ça ?

Parce que quand vous allez interviewer un scientifique dans la presse, aucun d'entre eux n'a, à cause de son travail – j'insiste : à cause de son travail – une vue sur l'ensemble de ces disciplines. Il peut en avoir une avec ses lectures. Ça ne lui est évidemment pas interdit, comme à vous. Mais ce n'est pas son travail qui va lui donner une expertise de même niveau sur tout ce qui est évoqué ici. Donc j'insiste là-dessus parce que c'est important de savoir que vous n'avez pas, encore une fois, de climatologues. C'est quelque chose qui n'existe pas.

Alors des fois on donne l'acception la plus proche de climatologue qu'on puisse trouver dans la communauté scientifique, c'est modélisateur. Le climatologue fait le modèle qui intègre les compétences de tous ses collègues. Bon à la limite, c'est la définition la moins mauvaise. Mais c'est quand même quelque chose qu'il est important de garder en tête.

11. L'effet de serre est de l'histoire (scientifique) très ancienne

1824 : Joseph Fourier, physicien français, publie "Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires", où il expose que la température du sol est augmentée par le rôle de l'atmosphère

1838 : Claude Pouillet, physicien français, puis Joseph Tyndall, un irlandais, attribuent l'effet de serre naturel à la vapeur d'eau et au gaz carbonique. Pouillet affirme que toute variation de la quantité de vapeur d'eau, comme de CO_2, doit se traduire par un changement climatique

1896 : Svante Arrhenius, chimiste Suédois (Prix Nobel 1903) prédit que l'utilisation intensive des combustibles fossiles engendrera un réchauffement climatique. Il donne un ordre de grandeur : 4° C en plus pour un doublement du CO_2 dans l'air.

1922 : Lewis Fry Richardson, un physicien anglais, tente une première expérience de modélisation du climat à partir des seules équations de la physique (sans ordinateur !).

1950 : Le premier ordinateur (l'ENIAC) est utilisé pour expérimenter le premier modèle numérique de prédiction météorologique

Diapositive 12.

Alors je vous disais que je me trompe toujours entre 1824 et 1826. Eh bien voilà vous avez la réponse, c'est donc 1824 la bonne date et donc 1826 : les gaz de schiste à l'est des États-Unis. En 1824 l'effet de serre est identifié par Joseph Fourier – vous avez entendu parler de Joseph Fourier ? Un tout petit peu ?

Donc notre ami publie un article dans lequel il dit : « Il y a quelque chose dans l'atmosphère qui fait que les températures au sol sont plus élevées que si ce quelque chose n'existait pas. » Donc, il y a deux siècles à quelques années près, il y a un scientifique français (cocorico !) qui comprend que les températures au sol sont augmentées par le rôle de l'atmosphère.

Vous avez quelques décennies plus tard à nouveau un Français, puis un Irlandais, qui identifient les deux principaux gaz à effet de serre que nous avons dans l'atmosphère, qui sont le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau.

Donc le fait de savoir qu'il y a un effet de serre et qu'il est provoqué au premier ordre par la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone, ça a plus d'un siècle et demi.

En 1896, un Suédois, monsieur Arrhenius (qui se trouve – puisqu'elle est de votre génération – être un des ancêtres de Greta Thunberg – enfin la Suède est un petit pays ils sont peut-être tous l'ancêtre de quelqu'un – donc qui se trouve être un de ses ancêtres), à ses heures perdues (parce qu'il ne pouvait pas regarder la télé à l'époque) il fait un petit calcul d'ordre de grandeur sur ce qui se passe si on double la quantité de gaz carbonique dans l'air. Et alors monsieur Arrhenius dit deux ou trois choses qui sont absolument fondamentales. Il dit :

1. « Si je double la quantité de CO_2 dans l'air, la température planétaire monte en moyenne de 4 °C. » Donc en 1896, il y a un premier calcul d'ordre de grandeur qui tombe sur le bon résultat – paraît-il un peu par chance m'a dit Hervé Le Treut, mais quand même.
2. Et par ailleurs Arrhenius comprend (probablement à cause du rayonnement du corps noir, soit dit en passant) que si on a un supplément d'effet de serre (c'est-à-dire un supplément d'interception des infrarouges terrestres, que vous avez partout à la surface de la planète) l'augmentation de température qui en résultera, toutes choses égales par ailleurs, sera d'autant plus marquée que la température de départ est basse. Car pour une même puissance rayonnée à nouveau vers le sol, plus la température de départ est basse et plus l'élévation de température est importante, à cause de T^4. Donc Arrhenius dit à cette époque-là quelque chose qui est parfaitement vrai, et qui aujourd'hui, permet de dire que c'est bien l'effet de serre qui est à l'œuvre :
   - « Ça augmentera plus vite aux pôles. » S'il y a plus d'effet de serre, la température s'élèvera plus vite aux pôles qu'aux tropiques. C'est très exactement ce qui est en train de se passer.
   - « Elle s'élèvera plus vite la nuit que le jour. » C'est également ce qui est en train de se passer.
   - « Elle s'élèvera plus vite l'hiver que l'été. » C'est également ce qui est en train de se passer.

Donc Arrhenius a compris ces deux choses-là en 1896 : à la fois que ça monte de 4 °C, et que la structure spatiale de cette élévation de température porte une signature particulière, qui est bien celle qu'on va retrouver aujourd'hui.

Vous savez que les Anglais sont un peu fous, c'est pour ça qu'ils sont créatifs. Ils sont à la fois conservateurs et fous. Et donc il y a quasiment un siècle, il y a un Anglais qui imagine de faire une simulation numérique.

Mais à l'époque, il n'y a pas d'ordinateur.

Donc comme il n'y a pas d'ordinateur, il dit : « Je vais prendre des physiciens » – donc tous les ingénieurs des Mines – et il se dit : « Je vais, tel un orchestre, tous les diriger à la baguette pour leur faire faire la résolution des équations d'une manière unitaire, les uns derrière les autres. »

Évidemment ça ne marche pas.

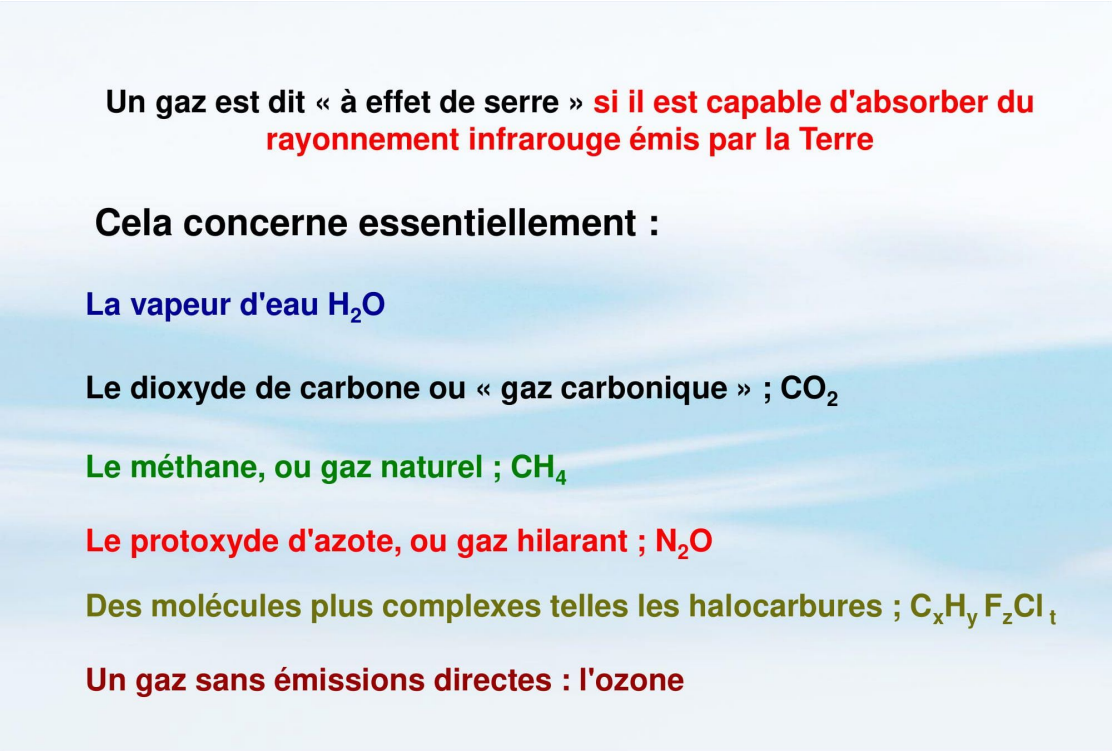
Mais dès que le premier ordinateur est mis au point – et vous verrez quelques-unes de ses caractéristiques dans un des prochains cours – quelques physiciens se jettent dessus pour faire le premier modèle de simulation du comportement de l'atmosphère.

Donc l'idée que l'on puisse utiliser des outils numériques, c'est-à-dire des modèles, pour essayer de comprendre ce qui va se passer plus tard, ce n'est pas apparu avec la dernière version de jeux vidéo. C'est quelque chose qui est très, très ancien au regard de la science climatique aussi.

Il y a un truc que je ne vous ai pas mis dans cette chronologie et que j'aurais dû vous mettre – j'y reviendrai après – c'est le moment où on a découvert les spectromètres de masse qui permettent de faire des analyses isotopiques. Parce que ces analyses isotopiques sont absolument cruciales pour reconstituer les températures du passé.

Donc il y a une autre date extrêmement importante, ce sont les années 70. À partir de ce moment-là on est capable d'analyser des sédiments ou, d'une manière générale, des échantillonnages prélevés ici et là sur la croûte terrestre – dont des fameuses glaces polaires – et avec des analyses isotopiques, de reconstituer des marqueurs du climat passé. Ça ce sont les années 70.

12. Vous avez dit gaz à effet de serre ?



Diapositive 13.

Alors je vous l'ai dit, un gaz à effet de serre a une définition extrêmement simple : c'est un gaz qui possède des raies d'absorption dans l'infrarouge terrestre. C'est la définition d'un gaz à effet de serre.

Il se trouve que cette propriété physique n'est accessible qu'aux gaz qui sont triatomiques ou plus. Donc un gaz diatomique ou monoatomique – a fortiori un gaz rare – ne peut pas avoir de raies d'absorption dans l'infrarouge terrestre. Donc l'oxygène est transparent à l'infrarouge terrestre. L'azote est transparent à l'infrarouge terrestre. Et l'argon aussi. Par contre :

— vous avez la vapeur d'eau, triatomique, qui possède des raies d'absorption ;

— vous avez le dioxyde de carbone, triatomique, qui possède des raies d'absorption ;

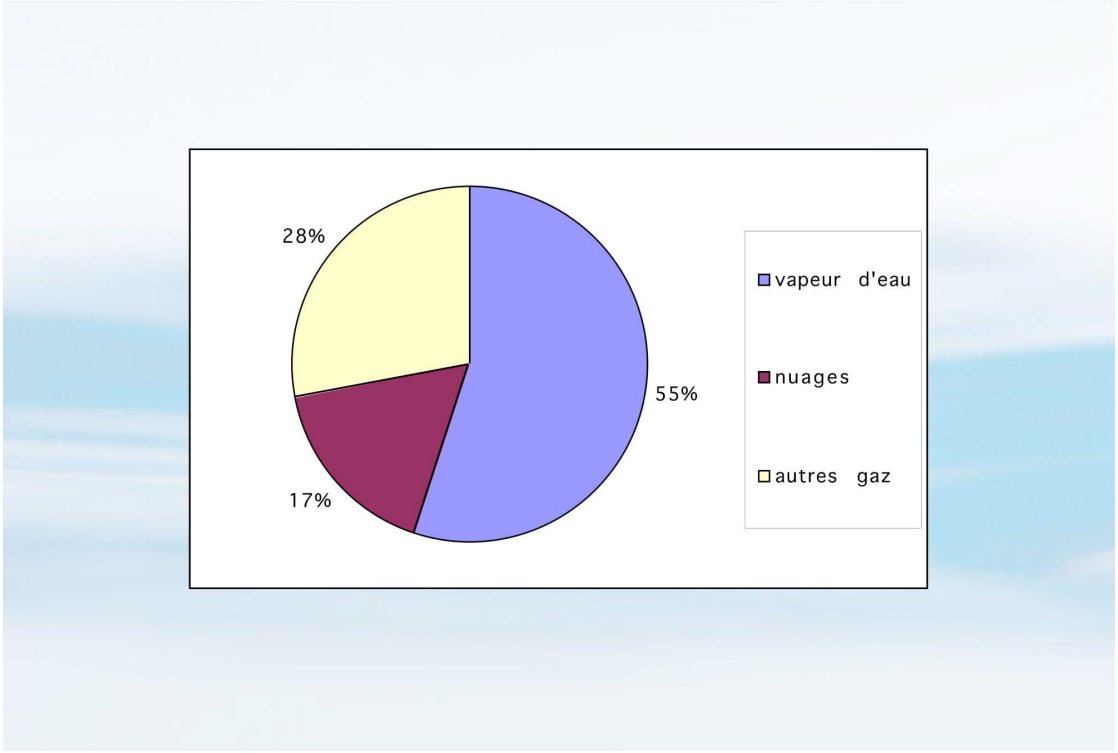
— vous avez le méthane, qui a cinq atomes, qui possède des raies d'absorption ;

— le protoxyde d'azote, qui possède également des raies d'absorption.

Et des gaz qui sont, là, du « pur Lego » inventé par les Hommes, qu'on appelle des halocarbures. Ce sont des hydrocarbures dans lesquels on a substitué tout ou partie de l'hydrogène par une molécule d'halogène (donc du chlore, du fluor, du brome, etc., on verra pourquoi on fait ça) qui sont également des gaz à effet de serre extrêmement puissants.

Et enfin, il y a un dernier gaz qui est un gaz à effet de serre, qui est l'ozone. L'ozone, c'est le couteau suisse de l'absorption. Il fait tout : il sait absorber les infrarouges terrestres et il sait aussi absorber les ultraviolets du soleil.

13. Origine de l'effet de serre « naturel » : que d'eau !



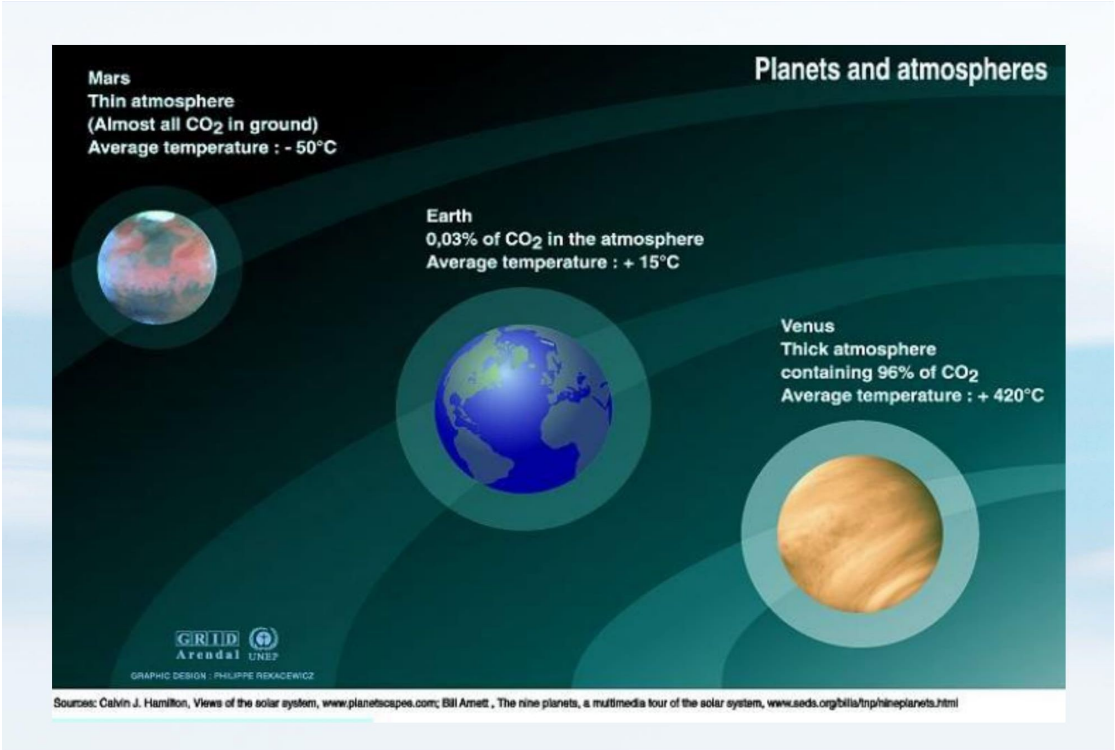
Diapositive 14.

Je vous l'ai dit, l'effet de serre est quelque chose de naturel sur Terre puisque vous avez deux gaz naturellement présents dans l'atmosphère, qui sont des gaz à effet de serre : la vapeur d'eau et le CO_2. Et le méthane aussi. Donc vous avez de l'effet de serre sur Terre depuis que vous avez dans l'atmosphère du CO_2, du méthane et de la vapeur d'eau. C'est-à-dire depuis ?

Quatre milliards et demi d'années.

L'atmosphère primitive de la Terre a notamment été formée par le volcanisme qui a conduit à des gros dégazages de CO_2. Donc dans l'atmosphère primitive de la Terre, vous avez déjà du CO_2. Donc l'effet de serre, c'est une histoire vieille de quatre milliards et demi d'années sur Terre.

14. La Terre n'a pas le monopole de l'effet de serre



Diapositive 15.

Soit dit en passant, cet effet de serre, comme il est dû au volcanisme primitif, on a une autre planète qui s'est également formée une atmosphère dans laquelle il y en avait beaucoup. C'est une planète tellurique. Elle a une densité de matière qui est proche de la nôtre. C'est Vénus.

Vénus a vraisemblablement eu une atmosphère primitive qui s'est formée comme la nôtre. Sauf que comme Vénus n'a pas porté la vie. Vénus n'a jamais eu les changements atmosphériques que nous avons connu sur Terre, avec d'abord l'apparition de méthane à cause des bactéries primitives qu'on appelle les archées, puis l'apparition d'oxygène avec les plantes primitives (puis plus développées) qui ont mangé le CO_2 et qui ont créé de l'oxygène.

Donc l'atmosphère de Vénus a toujours 90 à 95 % de CO_2. Et à la surface de Vénus, avec 90 à 95 % de CO_2, vous avez un effet de serre assez coquet puisque la température de surface dépasse les 400 °C.

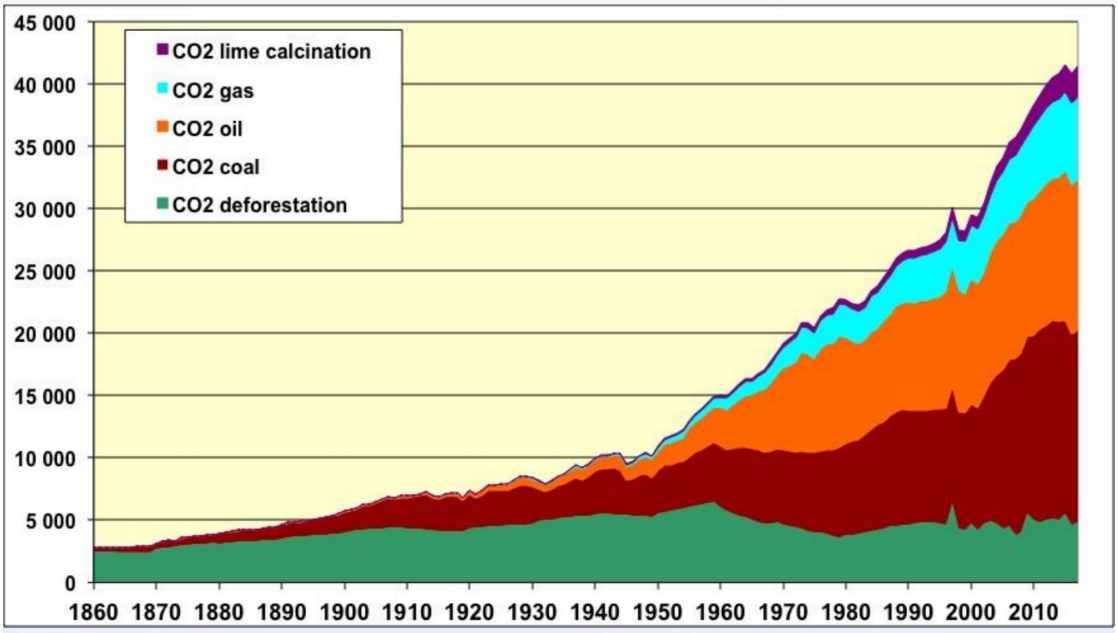
La différence entre Vénus et la Terre, c'est aussi que l'angle d'interception de Vénus est plus important, puisque Vénus est plus près du soleil.

Mais si vous regardez l'impact de cet angle d'interception plus important – le fait que Vénus soit plus près du soleil – sur la température d'équilibre, vous allez trouver quelques dizaines de degrés seulement. (Donc bonne nouvelle pour vous : ce n'est pas l'exercice que je vous donnerai à la fin de ce cours.) Ça n'explique pas pourquoi vous avez 400 °C de plus par rapport à la température planétaire.

Ce qui explique ces 400 °C de plus, pour l'essentiel, c'est l'effet de serre de Vénus. Extrêmement puissant, puisque vous avez (je répète) plus de 90 % de CO_2 dans l'atmosphère. Je ne pense pas que de votre vivant vous verrez ça, moi non plus du reste.

Cela étant, c'est juste là pour montrer que l'intensification de l'effet de serre peut très, très fortement changer le climat d'équilibre d'une planète. Ça peut très fortement le changer.

15. L'Homme, agent climatique



Emissions de CO_2 toutes sources depuis 1860. Calculs de l'auteur sur données Schilling et al. & BP Statistical Review pour les combustibles ; source CDIAC pour la déforestation et le ciment

Diapositive 16.

L'Homme a donc une action aujourd'hui sur la composition atmosphérique. Et la manière dont il a cette action, c'est au travers de ses émissions de gaz à effet de serre.

Le premier gaz à effet de serre que nous émettons en importance – après je vous dirai comment on calcule l'importance – c'est le gaz carbonique, ou *dioxyde de carbone* (CO_2). Le dioxyde de carbone, vous avez ici ses 5 causes planétaires qui sont d'origine humaine.

Première cause, la déforestation

Pourquoi la déforestation émet-elle du CO_2 ? C'est quoi en pratique la déforestation ?

∗ ∗ ∗ Marmonnement auditoire ∗ ∗ ∗

Alors quand on déforeste, on supprime la forêt. Il y avait des arbres, et on les a coupés. Qu'en fait-on ? Essentiellement, on les brûle, oui. L'essentiel de la déforestation, c'est du défrichage. C'est-à-dire qu'on coupe la forêt pour installer des surfaces à vocation agricole.

Mais même quand le bois coupé est exploité, vous avez une petite partie seulement du bois qui va vivre longtemps. Dans une forêt française, vous avez 7 % seulement d'un arbre coupé qui est du bois d'œuvre à longue durée de vie. Tout le reste, ça va rentrer dans des produits qui vont être soit à très courte durée de vie – typiquement du papier, des emballages, etc. – soit à durée de vie raisonnablement courte – typiquement le meuble Ikea qui ne va pas survivre : en général, il ne va pas vous survivre le meuble Ikea. Donc ça rentre dans des produits qui sont à durée de vie relativement courte, et une fois que le produit a fini sa vie, le carbone se retrouve dans l'atmosphère, parce qu'en général, c'est brûlé.

Donc là vous allez retrouver deux choses :

— C'est à la fois le carbone qui était contenu dans l'arbre qui va passer dans l'atmosphère (parce qu'encore une fois, on l'a essentiellement brûlé).

— La deuxième chose que vous allez trouver, c'est que quand vous transformez un sol de forêt en sol agricole, vous allez labourer. En labourant, vous exposez l'humus à l'oxygène de l'air, et donc vous allez aussi déstocker du carbone par oxydation de façon accélérée. Vous diminuez le contenu en carbone du sol.

Et ces deux processus ajoutés l'un à l'autre font les émissions de CO_2 provenant de la déforestation.

En ordonnée, vous avez des millions de tonnes. Donc, si vous enlevez les trois 0, vous avez des milliards de tonnes. J'aurais dû préciser.

Donc, vous avez ici la déforestation. Vous constatez que la déforestation est passée par une forme de maximum il y a quelques décennies. Et elle continue, elle est importante. La raison pour laquelle vous avez des fluctuations importantes ici alors que vous ne les aviez pas avant, c'est tout simplement que maintenant on a des statistiques sur des pas de temps plus courts que celles qu'on avait avant (c'est un biais de dépistage). Donc avant, c'est lissé.

Par ailleurs, apprécier la déforestation de manière statistique est un problème beaucoup plus compliqué qu'il n'y paraît parce que ça se fait essentiellement avec des observations satellitaires. Mais si vous déforestez sur une parcelle qui est sous la résolution du satellite (sous le pixel de l'image) vous ne voyez

pas. Si vous enlevez un arbre sur deux et que les houppiers des arbres restent à peu près comme ils étaient avant, vous ne voyez pas. Il y a plein de choses que vous pouvez ne pas voir avec l'imagerie satellite. Donc savoir exactement combien d'arbres on a coupé, c'est plus compliqué qu'il n'y paraît.

Deuxième, troisième et quatrième causes : utilisation des combustibles fossiles, charbon, pétrole et gaz

Vous avez ici un deuxième terme qui est le dioxyde de carbone qui vient de l'utilisation des combustibles fossiles. Utiliser du charbon, comme du pétrole, comme du gaz – cf. ce que je vous avais dit la dernière fois – c'est engendrer une réaction exothermique provoquée par de l'oxydation.

Vous prenez un composé de carbone et d'hydrogène (ça s'appelle un hydrocarbure) dans des proportions variables :

— beaucoup de carbone : composé solide = charbon ;

— moins de carbone : composé liquide = pétrole ;

— peu de carbone : composé gazeux = gaz naturel, méthane.

Vous prenez votre composé de carbone et vous l'oxydez. Ça vous donne une réaction exothermique qui va vous permettre d'alimenter des machines. Donc ça, c'est le dioxyde de carbone qui vient du charbon, du pétrole, et du gaz.

Cinquième cause : la « lime calcination »

Et alors là, vous avez un truc qui en anglais s'appelle « lime calcination » et en français s'appelle la calcination du calcaire. La calcination du calcaire, savez-vous pourquoi on fait un truc pareil ?

Pour faire du ciment ! Absolument.

Quelle est la formule du calcaire ? $CaCO_3$. Le ciment est essentiellement de la chaux vive, CaO, avec tout un tas de poudre de perlimpinpin que vous rajoutez dedans – un peu d'argile, un peu de marne, un peu de machins, etc.

Qui a déjà fait de la maçonnerie ici ? Vous avez remarqué que si vous ne mettez pas de gants, à la fin de la journée vous avez la peau des doigts complètement bouffée. Parce que le ciment, comme c'est de la chaux vive plus des poudres de perlimpinpin, ça vous agresse, c'est un oxydant. Ça vous agresse la peau. Donc les liants hydrauliques, d'une manière générale, vous agressent la peau.

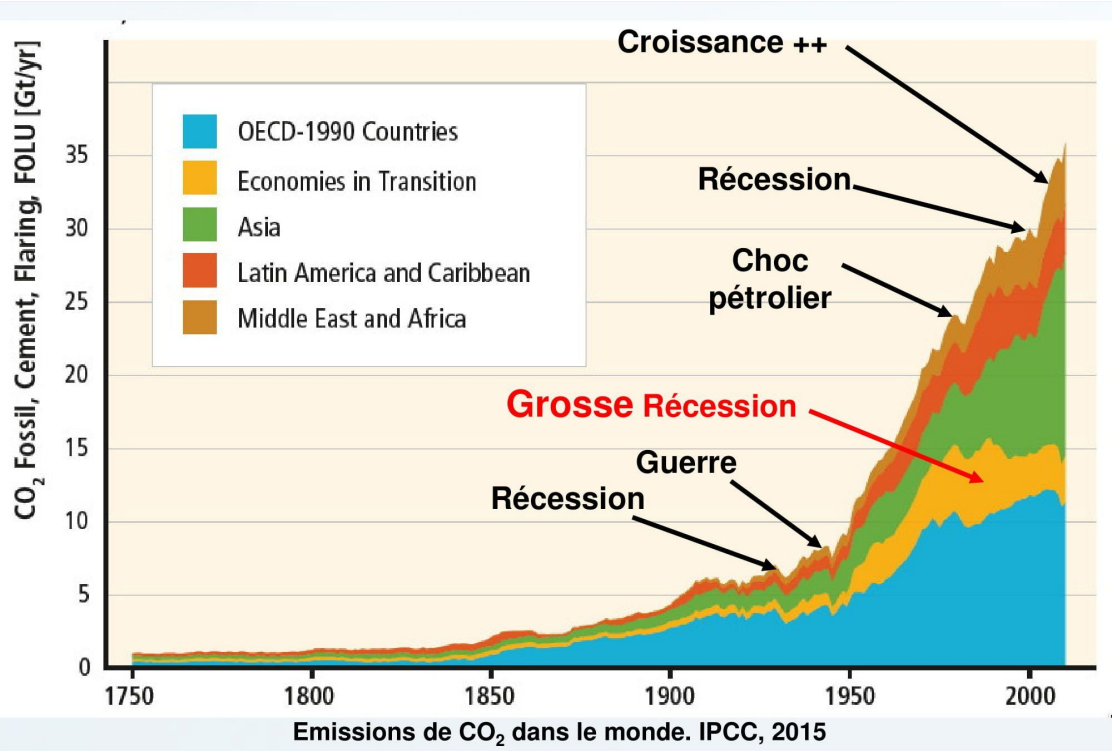
Pour faire CaO à partir de $CaCO_3$, c'est très simple : vous prenez une grande paire de ciseaux et vous coupez en deux. Donc vous prenez $CaCO_3$, vous mettez CaO d'un côté et CO_2 de l'autre.

Quelle est la grande paire de ciseaux qui vous permet de casser la molécule en deux ? Ça s'appelle un four, dans lequel vous portez votre calcaire à un peu plus de 1000 °C – comme dans *Les Indestructibles*, « 1000 °C ». Donc vous récupérez d'un côté CaO et de l'autre côté CO_2. Évidemment, le CO_2, vous n'en faites rien. Donc il part dans l'atmosphère. Eh bien ce que vous avez ici en « lime calcination », c'est le CO_2 issu des fours à ciment qui provient de cette rupture de la molécule de carbonate de calcium en deux.

Ça n'inclut pas le CO_2 provenant de l'énergie qui vous a été nécessaire pour chauffer le four. Ça, ce n'est pas dedans, c'est en plus. Là, c'est juste la calcination du calcaire.

Alors ici je vous donne une vision par source. Maintenant je vais vous donner une vision par zone.

16. Plus ça va (le PIB) et moins ça va (le CO_2) ...



Diapositive 17.

C'est un peu plus long comme échelle de temps, puisque nous partons de 1750. Vous n'étiez pas né, moi non plus. Vous voyez qu'à cette époque, des émissions, il n'y en a pas beaucoup. Il y en a quand même quelques-unes.

Et on va regarder comment évoluent les émissions au fil du temps :

— En bleu vous avez les émissions des pays anciennement industrialisés, les « OECD countries », qui augmentent, qui augmentent, qui augmentent, et qui ont tendance, depuis le pic énergétique dont j'ai parlé l'avant-dernière fois, à se stabiliser.

— En jaune, vous avez l'ancien bloc communiste. C'est ça qu'on appelle les économies en transition.

— En vert, vous avez l'Asie, et notamment la Chine, et vous voyez qu'aujourd'hui elle a dépassé la zone OCDE, et que c'est allé extrêmement rapidement.

— Et enfin en orange et marron, vous avez les autres pays.

Alors vous voyez qu'il y a quelques petites indentations sur cette courbe. Vous pouvez voir la récession de 1929. Vous voyez ce que ça vous donne en évolution annuelle : c'est-à-dire que vous avez un coup vers le bas, mais en tendance, pas grand-chose.

Retenez quand même que, à la fois la crise de 29 – son paroxysme plus exactement, soit l'année 1932 – et le paroxysme de la guerre de 39-45 – c'est-à-dire l'éradication industrielle de l'Allemagne et du Japon en 1945 – sont les deux seuls épisodes au cours du 20e siècle où les émissions annuelles ont baissé de 4 % ou plus.

Il y a eu deux années au cours du 20e siècle où les émissions annuelles ont baissé de 4 % : 1932 et 1945. Alors retenez bien, parce que si on est sérieux sur l'accord de Paris, il faudrait faire ça tous les ans à partir de maintenant, en démarrant la semaine prochaine, jusqu'à ce que vous ayez mon âge.

Tous les ans. Il faut faire tous les ans, dans le monde, un effort qui est du même ordre de grandeur que ce qu'on a obtenu pendant ces deux années-là. Ne rigolez pas, ça va être à vous de le faire.

— Ici vous avez un choc pétrolier. Vous voyez, je ne vous récite pas ce qu'a dit Chirac mais j'y pense très fort.

— Là, vous avez une petite récession. Ça ne dure pas très longtemps.

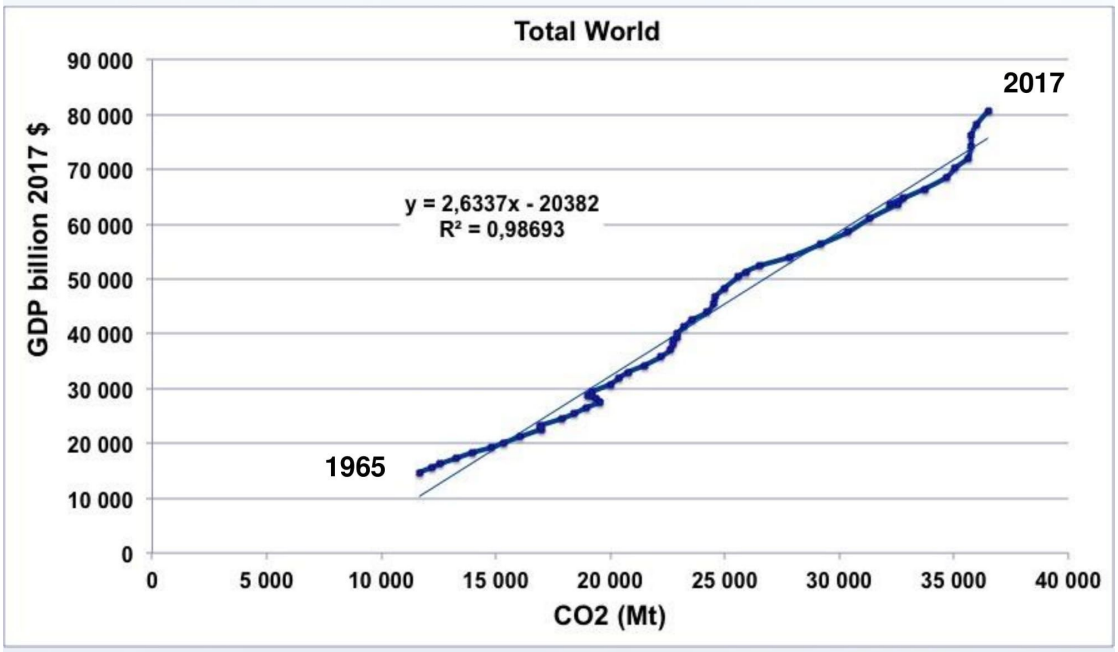
— Là, vous avez une très forte croissance qui a été le décollage industriel de la Chine.

— Et là par contre, vous avez quelque chose qui a été très efficace pour faire baisser les émissions, c'est l'effondrement économique des pays communistes après la chute du Mur. Ça marche très, très bien.

Vous verrez la prochaine fois que malheureusement, « ça marche très, très bien » : c'est bien ça qui pourrait marcher *in fine* pour respecter le fait que le monde est fini.

Parce que pour le moment, on a un drame dans cette histoire. Que voici.

17. Plus de PIB avec moins de CO_2



Emissions de CO_2 (en abscisse) et PIB en dollars constants (ordonnée) pour le monde. Données primaires World Bank pour le PIB et BP stat pour l'énergie

Diapositive 18.

Je vous ai montré au cours du premier cours que plus de PIB ça voulait dire plus de flux productif. Que le flux était par définition mesuré par l'énergie. Donc ça voulait dire plus d'énergie. Et comme l'énergie est essentiellement fossile, ça veut aussi dire plus de CO_2.

Donc ce que vous voyez sur ce graphique, c'est le drame des négociations climat. C'est le drame parce que faire moins d'émissions de CO_2 de manière massive, aujourd'hui, personne ne sait concevoir ça sans faire une baisse significative du PIB. Personne ne sait faire ça aujourd'hui. On y reviendra, mais en gros, personne ne sait faire ça.

Donc le drame des négociations climat, il est là.

Et je ne sais pas qui dans la salle connaît Brice Lalonde ? Les deux vieux du fond. Alors Brice Lalonde a été candidat écologiste (donc il a fait ses quelques pourcents des voix en France) à une époque où non seulement vous n'étiez pas nés, mais moi je n'étais pas vieux. Il a été ambassadeur climat de la France et

il était notamment à Copenhague, on était ensemble à Copenhague en 2009. Il a fait toutes les COP. (Du reste, si les élèves qui organisent des conférences ici veulent l'inviter un jour à faire une conférence, c'est un très bon orateur, et il a une façon très imagée et très parlante de raconter un milliard d'anecdotes.)

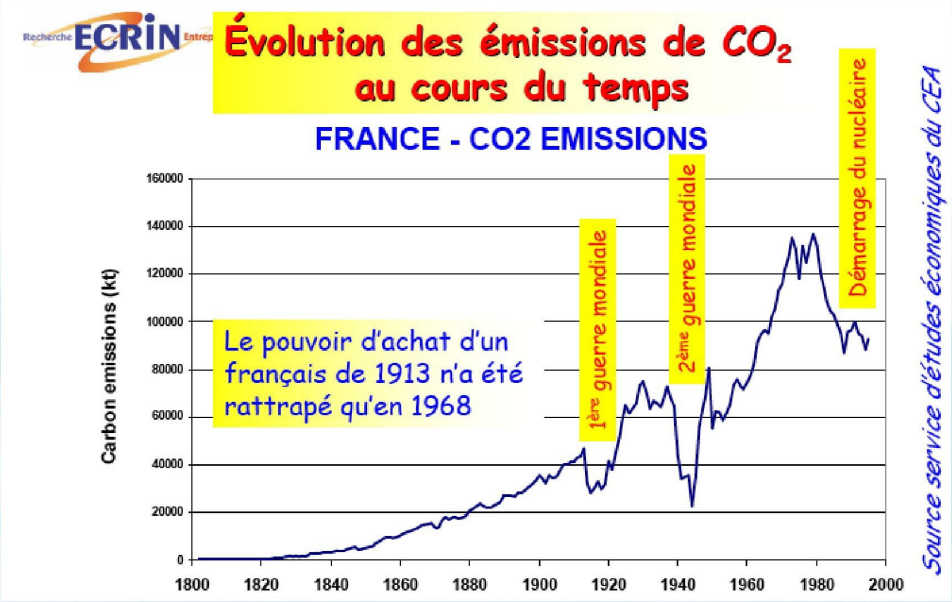
Donc c'est très simple ...

Et Brice a dit un jour – sachant qu'il a fait toutes les COP depuis le début : « Le problème des négociations climat, c'est que depuis l'origine, les pays occidentaux viennent en pensant qu'on va parler climat, les pays en développement viennent en pensant qu'on va parler développement, et c'est le développement qui gagne. » Parce que, comme je vous le rappelle là – ce n'est pas une démonstration, c'est un rappel – aujourd'hui on ne sait pas faire plus de PIB sans utiliser plus de machines, et donc plus d'énergie.

Et donc : « prrrt ».

On verra dans les cours qui viennent si on peut n'utiliser que de l'énergie décarbonée, et vous verrez que ce n'est pas si simple.

18. En France aussi, plus ça va et moins ça va



Emissions de CO_2 provenant de combustibles fossiles en France depuis 200 ans

Source CEA.

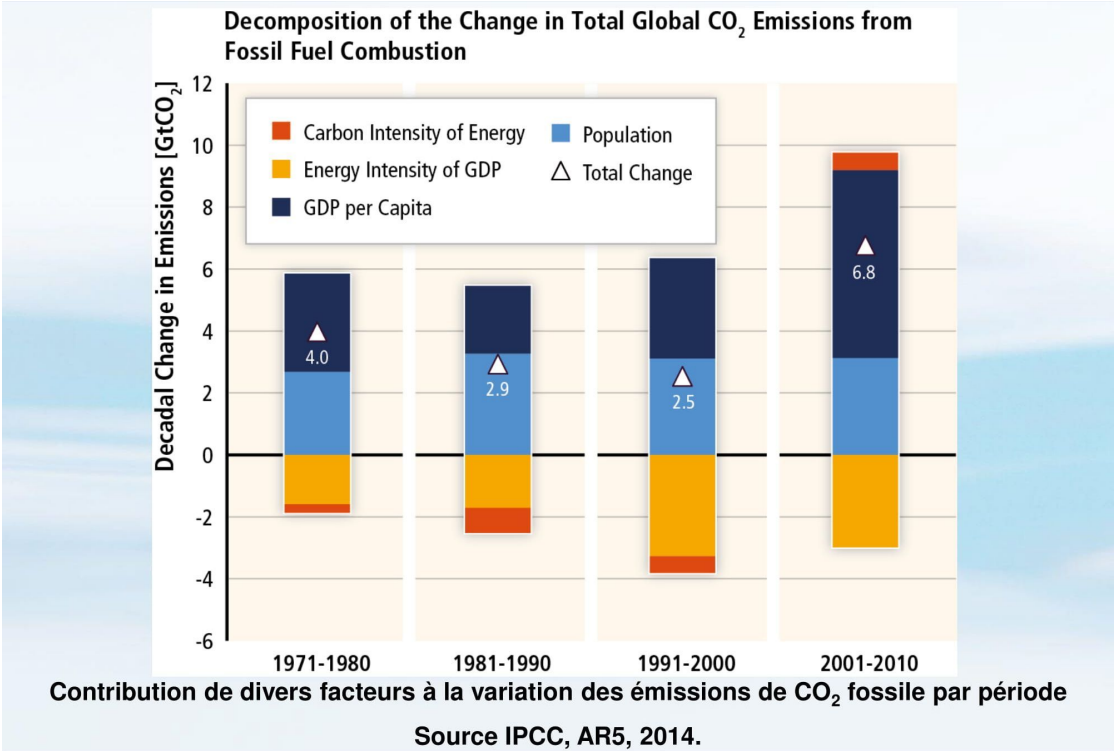
Diapositive 19.

Ici, vous avez la trajectoire des émissions de CO_2 de la France. Alors vous voyez qu'en série longue, on est à peu près comme les autres. C'était tout petit, ça a augmenté, il y a des accidents, etc. Aucun des accidents n'empêche vraiment la hausse tant que la production économique croît.

Il y a un truc quand même qui a bien calmé le jeu, c'est le programme nucléaire français, que vous voyez ici.

Cela étant, maintenant, dès qu'on a la possibilité de faire croître le PIB – ce qu'on aimerait bien faire quand on est au gouvernement en ce moment (on n'y arrive pas trop mais c'est ce qu'on souhaite) – eh bien les émissions ont tendance à repartir à la hausse aussi.

19. Vivent le charbon, le PIB et les enfants !



Diapositive 20.

Ce graphique vient du dernier rapport du GIEC et il donne la contrepartie de la variation des émissions sur les quatre dernières décennies en fonction de l'équation de KAYA.

Alors qui connaît déjà l'équation de KAYA ?

Personne. Vous ne vous ennuierez pas trop la prochaine fois. Alors l'équation de KAYA est une équation qui décompose les émissions de CO_2 en 4 termes qui sont respectivement :

— la population ;

— le PIB par personne ;

— l'intensité énergétique du PIB ;

— l'efficacité CO_2 de l'énergie.

Et ces quatre barres-là disent que vous avez eu un rythme de variation des émissions toujours positif. Donc une croissance des émissions sur les quatre dernières décennies (qui est le triangle que vous avez là).

Mais ça se décompose en :

— une amélioration de l'efficacité énergétique de l'économie – qui est la barre jaune ;

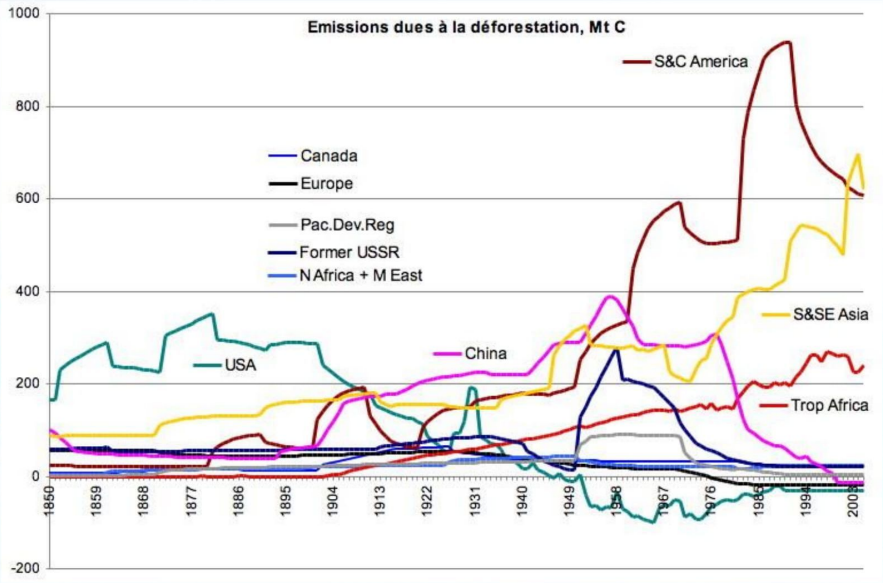
— une amélioration de l'efficacité carbone de l'économie sur les trois premières décennies de ce graphique, mais pas la dernière décennie (que vous voyez ici : ça se dégrade – en fait c'est l'essor industriel de la Chine et l'explosion du charbon) ;

— et vous avez également deux autres termes qui sont la population et la production par personne. Dit autrement : plus nous sommes nombreux, plus – toutes choses égales par ailleurs – nous émettons. C'est malheureusement arithmétique. Et par ailleurs, plus nous créons de flux physiques à base de machines par personne – c'est-à-dire plus nous créons de PIB par personne – plus nous avons une grande quantité d'énergie utilisée. Et comme cette énergie est fossile : plus nous émettons.

Donc, pendant les quatre décennies qui viennent de s'écouler, l'augmentation démographique et l'augmentation de la transformation de l'environnement par personne (c'est ça le PIB par personne) sont allées plus vite que les gains que vos prédécesseurs (sortis de cette même école) ont pu faire dans les machines que nous utilisons pour vivre (c'est-à-dire la quantité de CO_2 qu'on met dans l'air quand on utilise un kilowattheure, et la quantité de machines ou la quantité de kilowattheures qu'il faut utiliser pour faire un dollar de valeur ajoutée).

Ces deux paramètres techniques ont constamment évolué moins vite dans le bon sens que les deux paramètres qui poussent les émissions à la hausse n'ont évolué dans l'autre sens.

20. La déforestation, historiquement la première source



Emissions dues à la déforestation, par grande zone, de 1850 à 2005.

Source : Houghton, The Woods Hole Research Center sur http://cdiac.ornl.gov/trends

Diapositive 21.

Petit zoom sur la déforestation : vous voyez que les zones qui ont été déforestées ne sont pas les mêmes en fonction des époques.

Vous voyez en particulier qu'il y a un siècle et demi, le champion du monde de la déforestation était l'Amérique du Nord. Aujourd'hui, le champion du monde de la déforestation est plutôt l'Asie du Sud-Est, après que ça a été longtemps l'Amérique Latine. Cela étant, ça déforeste encore dans plein de pays dans le monde.

La déforestation a deux déterminants très simples :

— Le premier – comme on déforeste pour augmenter les surfaces cultivables – est la taille de la population. Donc plus la population croît, plus on déforeste. Très simple.

— Et le deuxième déterminant est : plus un régime est carné, plus vous allez avoir besoin de surfaces agricoles importantes pour nourrir les bêtes que vous allez manger au lieu de manger directement les végétaux qui

poussent. Donc plus vous avez une surface par personne importante – enfin plus vous avez besoin d'une surface par personne importante qui est évidemment prise là où on peut la prendre, c'est-à-dire sur la forêt.

Donc je vais le dire de manière beaucoup plus résumée et beaucoup plus cash : « Il y a deux déterminants essentiels à la déforestation, c'est l'augmentation de la population et l'augmentation de la part carnée dans l'alimentation. » Voilà les deux déterminants essentiels de la déforestation.

∗ ∗ ∗ Question auditoire ∗ ∗ ∗
« Qu'est ce qui a poussé l'Amérique à diminuer la déforestation ? »

Il y a moins de trucs à couper. En Europe, le minimum forestier – je vous l'ai dit au cours du premier cours – c'était 15 % de couverture de la surface européenne en 1850. Donc, on s'est arrêté de déforester parce que essentiellement il n'y avait plus rien à couper. Parce que 15 %, c'est aussi à peu de choses près les forêts qui couvrent les montagnes, les très hautes latitudes, etc. Là où vous n'avez pas envie d'aller mettre des trucs à cultiver. Mais toute la Beauce a été déforestée. Toute la plaine aquitaine a été déforestée. Etc. La forêt landaise a été replantée par derrière.

Quand vous avez toutes les plaines qui sont occupées, vous vous arrêtez. À quelques exceptions près, c'était ça. Dit autrement : quand vous trouvez un équilibre entre la population et les surfaces cultivables, vous arrêtez de déforester.

Donc, soit cet équilibre est trouvé par la limitation (par la famine) – donc à un moment les surfaces cultivables et les rendements font que vous ne pouvez pas augmenter la taille de la population (vous avez déforesté tout ce qui pouvait être déforesté sauf les montagnes et les machins comme ça, enfin si, même ça vous pouvez un peu déforester, mettre des cultures en terrasse comme dans les Cévennes) – ou bien le point d'équilibre se trouve avant.

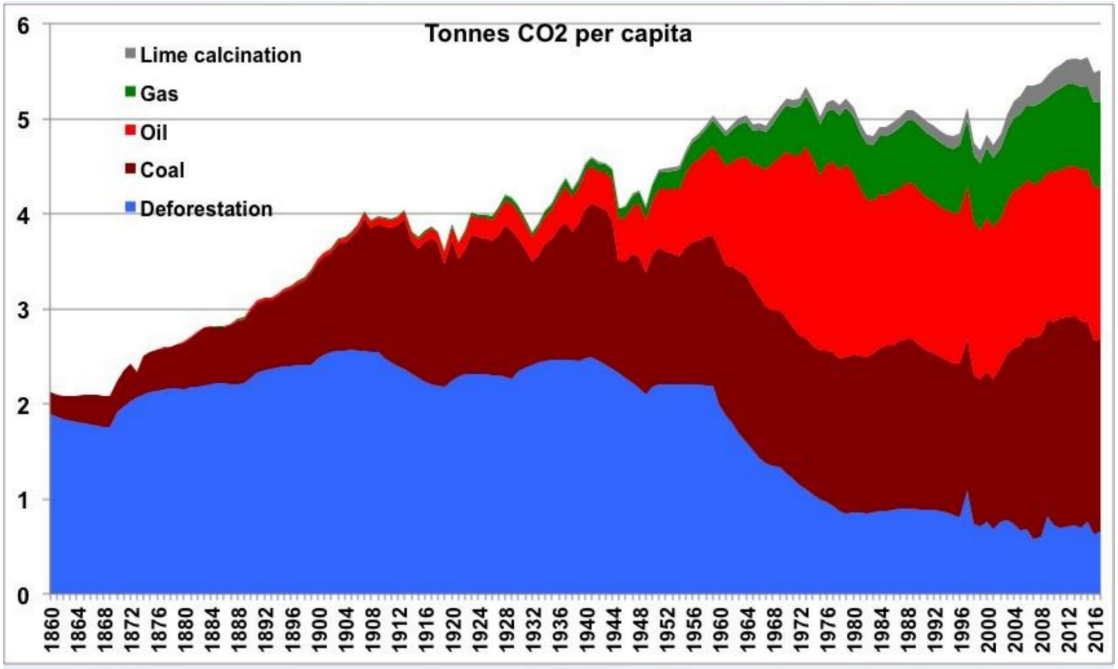
Et alors en particulier aux États-Unis, un des trucs qui a aussi sauvé les forêts, ce sont les tracteurs et les engrais. Parce que quand vous augmentez les rendements à l'hectare des cultures, vous n'avez pas besoin d'aller chercher des surfaces ailleurs. Et soit dit en passant, quand on dit qu'il faut faire de l'agriculture extensive ça veut dire reposer le problème de la déforestation. Puisque si vous avez le même régime alimentaire en provenance d'une surface moins productive, vous avez besoin de plus de surface.

Donc vous avez un conflit d'usage évident, enfin un conflit d'objectif plus exactement, entre trois trucs qui sont :

— la production de viande ;
— les phytosanitaires/les engrais ;
— la déforestation.

C'est un truc compliqué.

21. Et les émissions de CO_2 par personne, ça donne quoi ?



Emissions de CO2 par personne depuis 1880. Calculs de l'auteur sur données Schilling et al. & BP Statistical Review pour les combustibles ; données The Carbon Budget pour la déforestation et le ciment ; UN pour la population.

Diapositive 22.

Vous avez ici maintenant une autre manière de voir les émissions de gaz à effet de serre qui ne sont pas les émissions de gaz à effet de serre de la population dans son ensemble, mais qui sont les émissions de gaz à effet de serre par personne.

Alors par personne, vous allez me dire que c'est évident : c'était extrêmement faible au début de l'ère industrielle et puis ça a explosé après. Si vous regardez le CO_2 qui provient des combustibles fossiles : oui. Puisque le marqueur de l'ère industrielle, c'est d'avoir justement utilisé des machines qui mangent des combustibles fossiles.

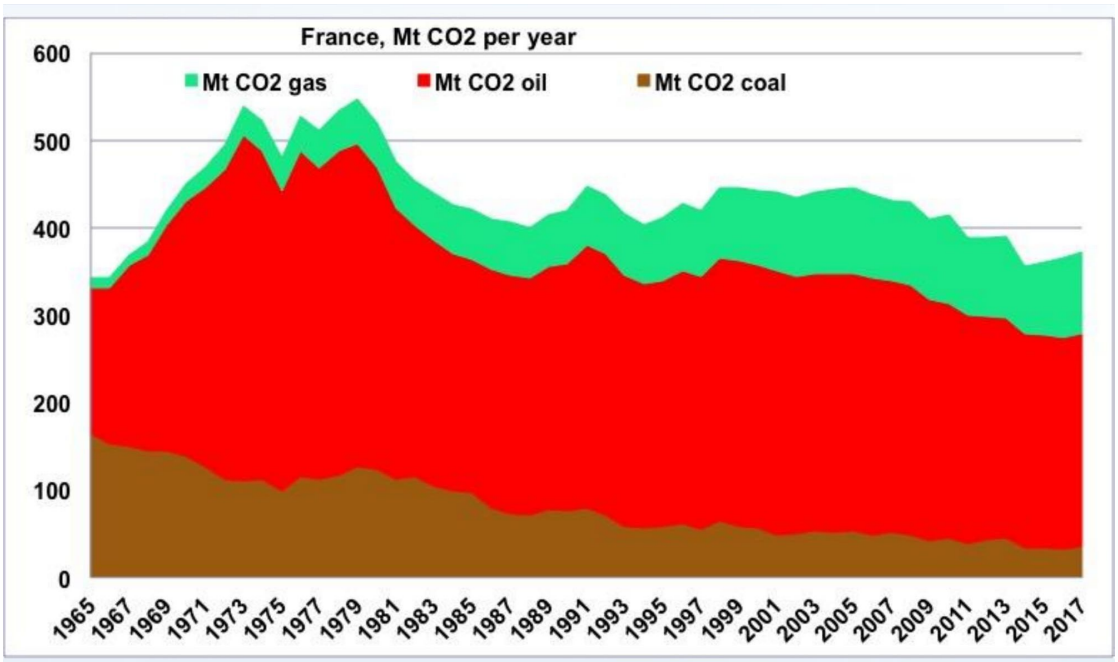
Si vous rajoutez le CO_2 issu de la déforestation vous voyez que le tableau n'est pas du tout le même. En un siècle et demi les émissions de CO_2 par personne n'ont été multipliées « que » par deux et demi. Que par deux et demi.

21. ET LES ÉMISSIONS DE CO_2 PAR PERSONNE, ÇA DONNE QUOI ?

Alors que sur la même période, la population humaine a été multipliée par 5 ou 6.

Donc vous voyez que les émissions de CO_2 par personne ont augmenté, mais les émissions liées à la déforestation ont fortement baissé.

22. Et en France ? (1/3)



Emissions de CO_2 en France depuis 1965, en millions de tonnes. Calculs de l'auteur sur données BP Statistical Review 2018

Diapositive 23.

Petit zoom sur la France : ici vous avez les émissions de CO_2 tricolores (il y a vraiment trois couleurs sur ce graphique). Vous constatez qu'aujourd'hui, elles sont inférieures à ce qu'elles étaient au moment du premier choc pétrolier : on a moins d'émissions de CO_2.

Et vous voyez en particulier que celles du pétrole et du charbon ont fortement baissé. Alors le pétrole a été chassé des usages industriels et d'une partie du chauffage par le gaz et l'électricité.

Le charbon a été chassé des usages industriels pour deux raisons :

— La première : c'est qu'une fois que la France eut fini de construire ses infrastructures, on a eu besoin de moins produire d'acier, or un des gros consommateurs de charbon, c'est la sidérurgie.

— La deuxième raison est que l'on a fait moins d'électricité au charbon, on en a utilisé moins dans l'industrie.

Par contre, vous voyez que le gaz avait tendance à augmenter ces émissions de CO_2 (en fait ça a cessé d'être vrai depuis le milieu des années 2000). Donc vous voyez qu'on a quand même une tendance lourde sur ce graphique.

∗ ∗ ∗ Question auditoire ∗ ∗ ∗

S'il n'y a pas aussi une absorption de CO_2 ? Là ce sont des émissions brutes. Il n'y a pas l'absorption des forêts là-dedans. Ce sont vraiment les émissions brutes. La comptabilisation des puits est un truc indémerdable – j'en parlerai rapidement mais c'est un truc très compliqué. Donc les émissions brutes de CO_2 en France ont plutôt tendance à baisser depuis les chocs pétroliers.

Si, soit dit en passant, vous voyez dans le journal : « Ah !, les émissions ont augmenté par rapport à l'année dernière ! » Au regard de la série longue que je vous montre là, que vous pouvez-vous en déduire ?

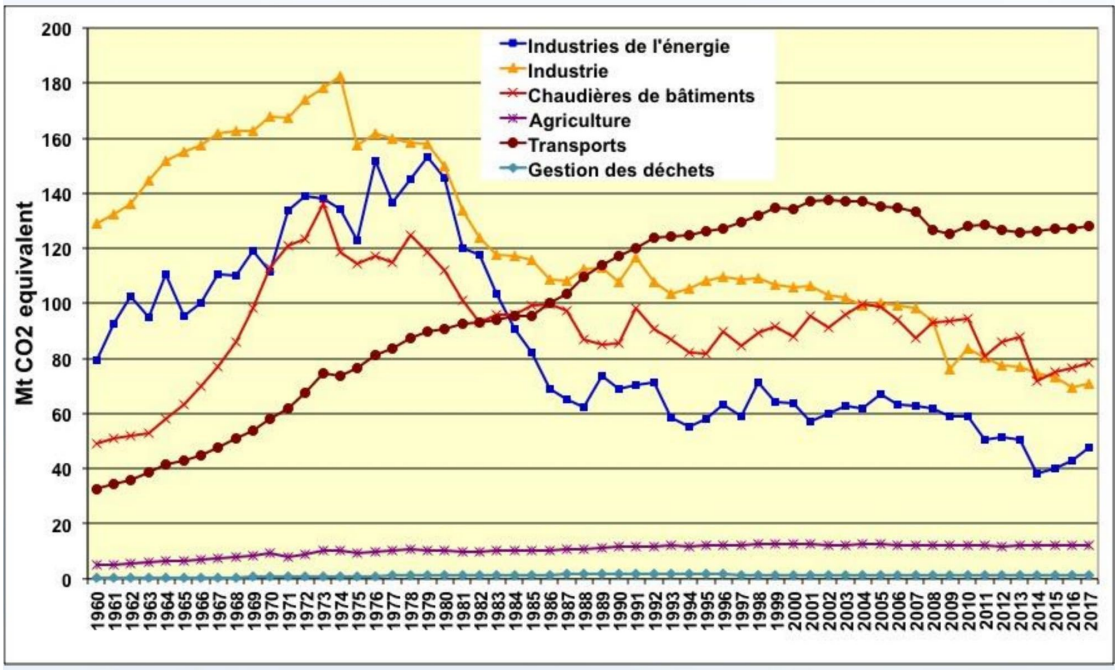
∗ ∗ ∗ Réponse auditoire ∗ ∗ ∗

Non ! Vous n'en déduisez rien.

Quand vous êtes en train de regarder une évolution sur série longue, vous voyez qu'il y a des petits machins qui montent, qui descendent, qui montent qui descendent, etc. Quand vous avez ce genre de trucs, la seule conclusion que vous pouvez en tirer, c'est *rien*. Ça n'empêche pas les gens qui ont besoin d'actualité de vous dire « Ah ! c'est parce que ceci, c'est parce que cela, c'est parce que machin, etc. » En fait sur une année, vous en tirez essentiellement la conclusion que : « Attendons de voir. »

Alors c'est évidemment ennuyeux ce que je suis en train de vous dire, parce que dans un monde qui est régi par la réaction de court terme, de ne pas être capable de faire une attribution des causes précises sur ce qu'on est en train d'observer, c'est ennuyeux...

23. Et en France ? (2/3)



Emissions de CO_2 en France depuis 1960, en millions de tonnes. Source CITEPA 2018

Diapositive 24.

Ici vous avez la même chose, discriminée par secteurs d'utilisation. Il y a quelques éléments qui sont assez frappants sur ce graphique.

D'abord vous voyez que l'ordre dans lequel les émissions arrivent aujourd'hui n'est absolument pas l'ordre dans lequel ça arrivait au moment du maximum, au premier choc pétrolier. À ce moment-là, l'essentiel de l'utilisation – enfin des émissions de CO_2 – était le fait de l'industrie et pas du tout des transports comme c'est le cas aujourd'hui. Vous voyez que les émissions de CO_2 de l'industrie, à partir des chocs pétroliers, ont très fortement baissé. Ce qui est une autre manière de dire que l'industrie est le secteur dans lequel la consommation est la plus sensible au prix. Est-ce que vous savez pourquoi ?

Parce que tout brillant ingénieur des Mines que vous êtes, dans votre vie personnelle, vous compterez beaucoup moins attentivement ce que vous faites que dans votre vie professionnelle. Donc, dans la vie personnelle, les gens sont beaucoup moins sensibles, malgré ce qu'on vous apprend en économie. Nous ne sommes pas que des êtres rationnels, et donc vous êtes beaucoup moins sen-

sibles aux variations de prix qu'on peut l'être dans les entreprises où l'on fait des tas de calculs extrêmement savants pour savoir si on ne peut pas gagner trois centimes ici, plutôt que d'en perdre deux là.

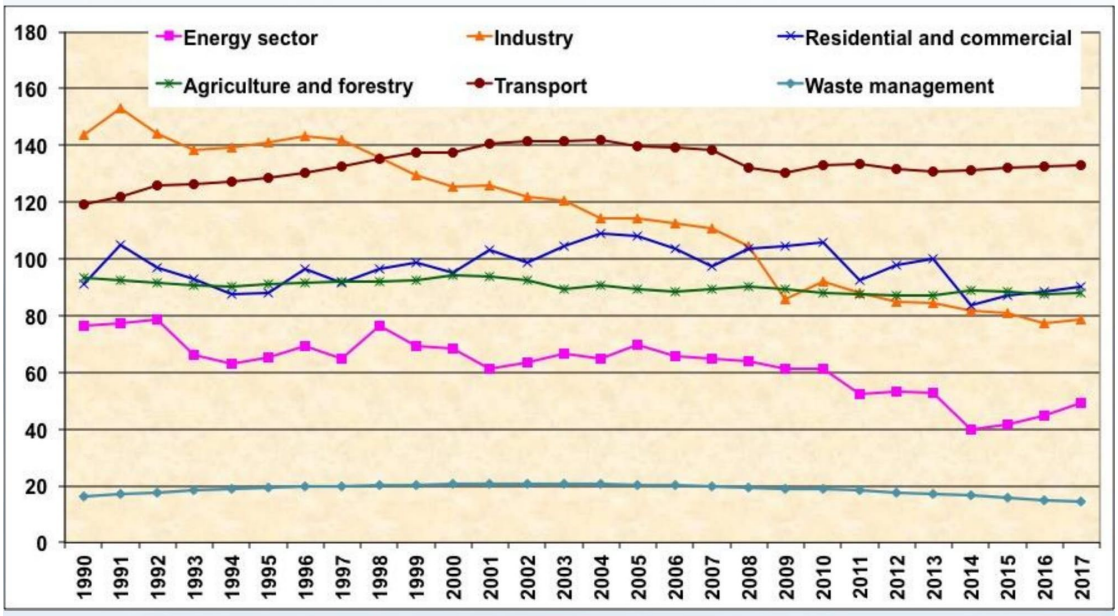
C'est la raison pour laquelle le secteur industriel est beaucoup plus sensible à des variations de prix que le secteur des particuliers. Ça réagit plus vite. Et du reste, vous voyez que la même variation des cours du pétrole appliquée à l'industrie ici, ça change fortement la donne. Alors que là, ça ne change à peu près rien. La consommation de pétrole dans les transports a évolué avant/après à peu près de la même manière.

Après vous avez un deuxième endroit où ça se met à bouger significativement : ce sont les industries de l'énergie, c'est-à-dire les centrales électriques et les raffineries. Et ça, c'est essentiellement le fait des centrales électriques : on avait de plus en plus de charbon, de pétrole et de gaz dans les centrales électriques ; on en a de moins en moins, notamment du pétrole, et on se met à tout remplacer par du nucléaire. Vous voyez l'effet ici.

Vous le voyez également dans les bâtiments (donc le résidentiel, tertiaire) – enfin dans les chaudières des bâtiments plus exactement : ça se met également à baisser.

Et le seul secteur dans lequel ça a continué d'augmenter, ce sont les transports. Cela étant, vous voyez que dans les transports, ça a tendance à baisser depuis le milieu des années 2000. Et ce n'est pas un effet de la conscience climatique, parce que c'est un effet que vous constatez dans tous les autres pays européens à peu près au même moment : c'est un effet du stress régional d'approvisionnement en hydrocarbures liquides dont je vous ai parlé au cours précédent. C'est un effet de ça.

24. Et en France ? (3/3)



Emissions de gaz à effet de serre en France depuis 1990, en millions de tonnes équivalent CO_2. Source CITEPA 2018

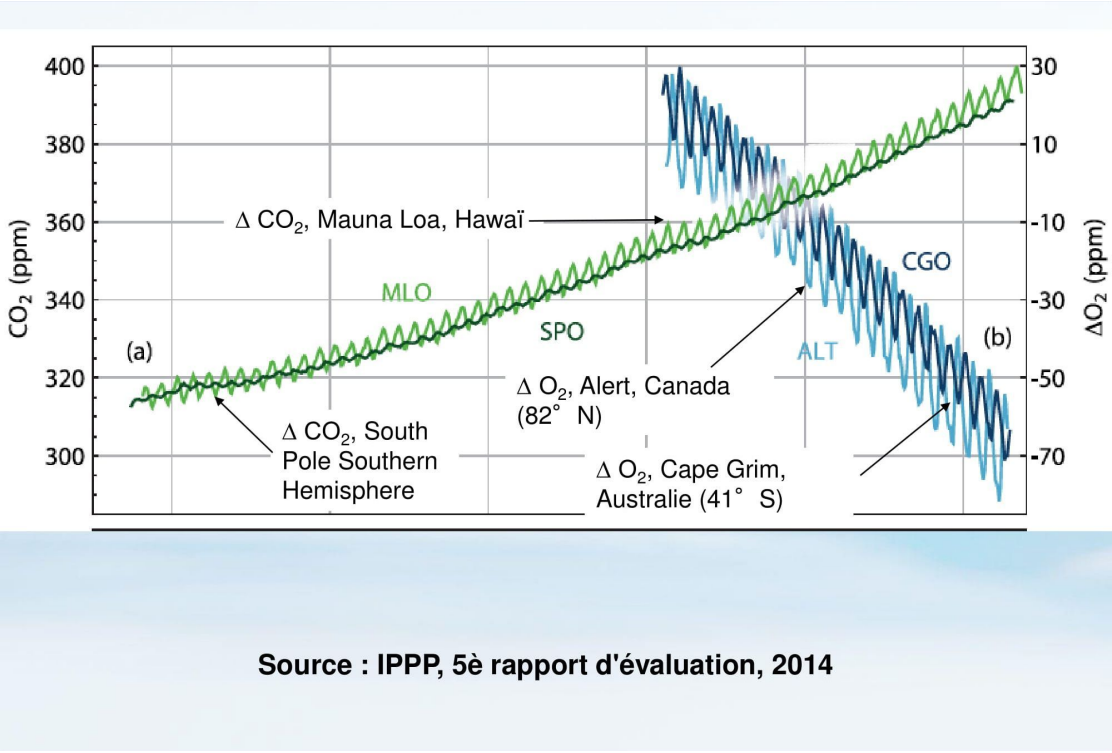
Diapositive 25.

Si on prend tous les gaz à effet de serre confondus, voilà comment ça se décompose. Vous avez toujours les transports qui arrivent en tête.

Mais par contre – il faut bien regarder – ici vous voyez l'agriculture qui est tout en bas, et vous voyez l'agriculture qui remonte beaucoup plus haut.

Je ne vais pas détailler pour le moment parce que je vais y revenir après : c'est lié au fait que ça émet d'autres gaz que simplement le CO_2.

25. Une partie de ce CO_2 se trouve très bien dans l'air



Diapositive 26.

La quantité de CO_2 dans l'air augmente – je vous l'ai montré tout à l'heure – j'y reviendrai après en vous expliquant comment on mesure ça sur une longue période.

Cette quantité de CO_2 qui augmente, on a une cause naturelle qui pourrait la conduire à augmenter – j'en ai parlé tout à l'heure – qui est ? C'est la cause qui a fait apparaître le CO_2 dans l'atmosphère primitive de la Terre... Le volcanisme. Si le CO_2 apparaît dans l'air par le volcanisme, au moment où j'ai une augmentation de la quantité de CO_2 dans l'air, ai-je une raison particulière de constater une diminution corrélative de la teneur en oxygène ? Oui ou non ? Non.

Ce que vous voyez ici, c'est la variation de la quantité de CO_2 dans l'air, avec la variation saisonnière. Et ici vous avez la variation de la quantité d'oxygène dans l'air – c'est évidemment sur une échelle extrêmement dilatée – et il y a également une variation saisonnière.

Est-ce que vous savez à quoi correspond cette variation saisonnière ?

∗ ∗ ∗ Réponse auditoire ∗ ∗ ∗

Non. Vous avez encore droit au « coup de fil à un ami » et au « 50-50 ». Oui ?

∗ ∗ ∗ Réponse auditoire ∗ ∗ ∗

Non. C'est saisonnier.

Le jour et la nuit, exactement.

Vous savez que la Terre possède deux hémisphères qui sont très dissymétriques en ce qui concerne les surfaces émergées. Vous avez beaucoup plus de surfaces émergées dans l'hémisphère Nord que vous n'en avez dans l'hémisphère Sud. Ce qui veut dire qu'au moment où c'est le printemps dans l'hémisphère Nord et où les plantes sont en croissance, la végétation en croissance va pomper du CO_2 en provenance de l'atmosphère.

De l'autre côté, dans l'hémisphère Sud, vous avez beaucoup moins de plantes à feuillage caduc qui vont avoir des feuilles qui vont pourrir et conduire le CO_2 à retourner dans l'atmosphère. Parce qu'en fait, une feuille qui pourrit, c'est une feuille qui se décompose sous l'action microbienne, et comme les microbes respirent comme vous, la respiration microbienne remet du CO_2 dans l'atmosphère : comme vous, les microbes absorbent de l'oxygène et ils rejettent du CO_2.

Donc, quand c'est le printemps et l'été dans l'hémisphère Nord, la teneur en CO_2 de l'atmosphère planétaire a tendance à légèrement baisser. Par contre quand c'est l'automne et l'hiver dans l'hémisphère Nord, la teneur en CO_2 de l'atmosphère a tendance à légèrement ré-augmenter.

Donc autour d'une tendance lourde qui est pilotée par nos émissions de CO_2, vous avez une oscillation saisonnière que vous voyez très très bien dans les relevés sur la teneur en CO_2. Si cette oscillation saisonnière va corrélativement avec une oscillation saisonnière de l'oxygène et que par ailleurs, la tendance lourde à l'oxygène c'est une légère baisse de sa concentration, ça veut dire que toute molécule de CO_2 qui apparaît dans l'air a pris une molécule d'oxygène dans l'air. On est d'accord ?

Donc ça veut dire que ce CO_2 n'a pu apparaître que par oxydation d'un carbone qui était disponible pour être oxydé.

Or vous avez deux endroits où le carbone est disponible pour être oxydé :

— vous avez la végétation – la décomposition des feuilles mortes ;

— mais vous avez aussi – et c'est ça la tendance – la combustion des combustibles fossiles.

Et c'est normal que la combustion des combustibles fossiles déstocke du carbone de sous le sol et corrélativement, vous allez déstocker un peu d'oxygène de l'atmosphère. Vous assemblez les deux, ça vous fait plus de CO_2.

Donc, ce que vous dit cette courbe sur l'oxygène, c'est que c'est bien un processus d'oxydation du carbone qui est à l'origine de l'apparition du surplus de CO_2 dans l'air. C'est une des manières qu'on a de montrer que le surplus de CO_2 qui apparaît dans l'atmosphère vient bien de quelque chose qui se passe à la surface de la planète et pas, par exemple, du volcanisme.

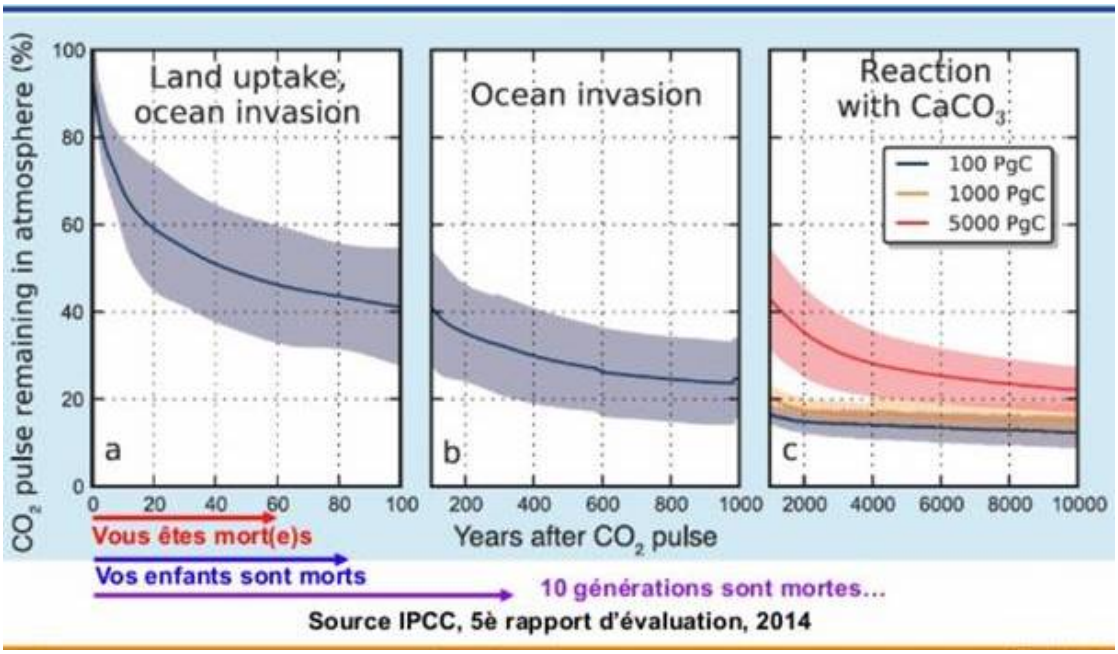
Il y a une deuxième analyse qu'on est capable de faire sur ce CO_2, qui montre que ça vient bien de chez nous. Vous avez entendu parler du carbone 14 ?

Alors le carbone 14, est-ce que vous savez comment il se forme ? Il se forme par transmutation de l'azote dans la haute atmosphère sous l'effet du rayonnement cosmique.

Donc sous l'effet du rayonnement cosmique, vous avez de l'azote dans la haute atmosphère qui absorbe – je ne sais plus si c'est un neutron ou un proton – qui a une indigestion, et qui se transforme en carbone 14. Ce carbone 14, après, rentre dans le cycle du carbone. Il va donc être ingéré par des êtres vivants.

Quand vous avez des combustibles fossiles qui sont d'anciens êtres vivants, ça fait des dizaines de millions d'années qu'ils sont sous terre. Ils ont totalement perdu leur carbone 14. Donc les émissions de CO_2 qui viennent des combustibles fossiles doivent appauvrir l'atmosphère en carbone 14. Ce qui vient de la vie, c'est un cycle du carbone 14 à durée de vie courte : l'arbre pousse, ça dure quelques dizaines d'années, ou quelques siècles, il meurt, et ça repart dans l'atmosphère. C'est une durée trop courte pour que ça change fondamentalement la teneur de l'atmosphère en carbone 14. Par contre, quand vous déstockez des combustibles fossiles et que vous rajoutez du CO_2 qui lui, est totalement dépourvu de carbone 14, ça vous change la teneur isotopique de l'atmosphère en carbone 14. Et on le constate aussi actuellement. Cela permet de dire que l'augmentation du CO_2 dans l'atmosphère vient bien de chez nous.

26. Les gaz à effet de serre aiment s'envoyer en l'air… et y rester



Diapositive 27.

∗ ∗ ∗ Question auditoire ∗ ∗ ∗

Non. C'est beaucoup trop imperceptible. J'ai dit tout à l'heure : là, c'est dilaté. On parle de « parties par million ». Donc on parle, pour le CO_2, de faire passer la teneur en CO_2 de 0,03 à 0,04 – 0,05 % de CO_2 dans l'atmosphère. Si vous enlevez 0,01 ou 0,02 % d'oxygène de l'atmosphère, ça fait une différence de pression partielle sur l'oxygène qui est beaucoup plus faible que quand vous allez au ski. Et vous avez constaté que vous revenez vivante du ski, enfin jusqu'à maintenant en tout cas…

Ne rigolez pas : Schumacher n'a pas eu tant de chance.

Donc cette diminution de la teneur en oxygène n'est pas suffisante pour que ça soit un problème. Par contre l'augmentation de la teneur en CO_2 de l'atmosphère à des niveaux plus élevés que ceux dont on parle aujourd'hui, mais pas considérablement plus élevés, ça peut devenir un vrai problème.

Aujourd'hui, il y a des gens qui sont en train de regarder si à 1000 ppm de CO_2 dans l'atmosphère, on ne commence pas à avoir des problèmes sanitaires

récurrents pour absolument tout le monde. Aujourd'hui, je vous rappelle qu'on est à 400.

Ce qui est sûr c'est qu'à 10 % de CO_2 dans l'atmosphère, vous mourrez. Il y a une toxicité aiguë du CO_2 et ce n'est pas juste parce que vous étouffez : je peux vous mettre 20 % d'oxygène au même moment, il y a une toxicité aigüe. Donc le CO_2 dans l'atmosphère, il ne vaut mieux pas qu'il y en ait trop.

Vous avez du reste constaté que quand vous êtes dans une atmosphère qu'on appelle viciée, dans une pièce qui n'a pas été aérée, vous pouvez avoir un peu mal à la tête. C'est un des effets possibles du CO_2.

Alors j'y reviens, le CO_2 est un oxyde : dioxyde de carbone. Vous le savez, parce que vous l'avez appris en chimie, que les oxydes sont des molécules qui sont extrêmement stables. C'est très stable un oxyde. Le fer qu'on trouve aujourd'hui sous forme de Fe_2O_3, dans les gisements de minerai de fer, ça fait des milliards d'années – depuis que les continents sont apparus et que le fer s'est oxydé – que c'est sous forme d'oxyde de fer. Et puis c'est resté comme ça. C'est extrêmement stable.

Cette stabilité du CO_2 – cette stabilité chimique – s'applique aussi au CO_2 que nous avons mis dans l'atmosphère. Une fois que le CO_2 est mis dans l'atmosphère, vous n'avez pas de processus chimique d'épuration de ce gaz. Il n'y a pas de processus chimique d'épuration du CO_2 de l'atmosphère.

Vous n'avez que deux processus d'épuration – j'y reviendrai plus tard – qui sont des processus physiques :

— Le CO_2 peut se dissoudre dans l'eau océanique. En fait, c'est un équilibrage de pressions partielles entre l'atmosphère et l'océan.

— Et le CO_2 peut être photo-synthétisé, c'est-à-dire qu'il peut être absorbé – enfin plus exactement métabolisé – par une plante, mais c'est une réaction endothermique : il vous faut un photon.

Donc spontanément vous n'avez pas de réaction chimique du CO_2 avec n'importe quoi dans l'atmosphère.

Le corollaire de cette affaire, c'est qu'une fois que le CO_2 se retrouve dans l'atmosphère – enfin que le surplus de CO_2 est créé dans l'atmosphère – son temps d'amortissement – le temps qu'il faut attendre pour que le surplus de CO_2 s'évacue – après arrêt des émissions, est extrêmement élevé.

Donc vous voyez ici qu'une fois que vous arrêtez les émissions (vous attendez... plus d'émissions...), eh bien ce que vous dit ce graphique, c'est que :

— Un siècle après, vous avez 40 à 50 % du surplus qui sera toujours au-dessus de nos têtes. Un siècle après, ce n'est même pas au-dessus des vôtres : vous serez déjà morts.

— 1000 ans après, vous aurez toujours de l'ordre de 20 % du surplus qui sera au-dessus de nos têtes.

— Et 10 000 ans après, vous aurez toujours de l'ordre de 10 % du surplus qui sera toujours au-dessus de nos têtes.

Donc je suis en train de vous dire que le processus du changement climatique n'a aucune réversibilité. Aucune.

Il n'y a pas un bouton « reset » sur lequel on peut appuyer un jour en disant « si j'avais su, j'aurais pas venu », et qui permettrait de recommencer l'expérience à zéro. On ne peut pas recommencer l'expérience à zéro. C'est une expérience qui sera faite une fois, et une seule.

Et à cause de cette inertie absolument considérable du CO_2 dans l'atmosphère – une autre chose que vous pouvez déjà garder en tête dès à présent – c'est que les conséquences du changement climatique – sur lesquelles je détaillerai un certain nombre de choses la prochaine fois – la seule garantie que vous avez c'est qu'au moment où vous, nous, l'Humanité, on considérera qu'elles seront intolérables, la seule garantie qu'on aura à ce moment-là, c'est que ça sera pire derrière.

À cause de cette stabilité du dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

∗ ∗ ∗ Question auditoire ∗ ∗ ∗

On met du CO_2 parce qu'on oxyde des combustibles fossiles. Les arbres ne le mangent pas suffisamment vite parce qu'ils sont limités par la photosynthèse.

Et après, dans les conséquences dont je vous parlerai, une des conséquences est que vous allez affaiblir les écosystèmes terrestres. C'est-à-dire qu'en plus, ils vont avoir moins envie de manger le CO_2 qu'avant. Vous avez un certain nombre de processus de rétroaction dans cette affaire – dont je parlerai la prochaine fois – qui sont des processus qu'on appelle positifs. C'est-à-dire d'amplification. C'est-à-dire que les premières conséquences du processus amplifient le processus. Et vous en avez un certain nombre, que je détaillerai la prochaine fois.

Là, vous avez évidemment la résultante de tous les effets : ce sont les émissions compte tenu du fait qu'il y a des absorptions. Donc je le redis, des absorptions, vous n'en avez que deux :

— Équilibrage de pressions partielles entre l'atmosphère et l'océan (c'est physique).

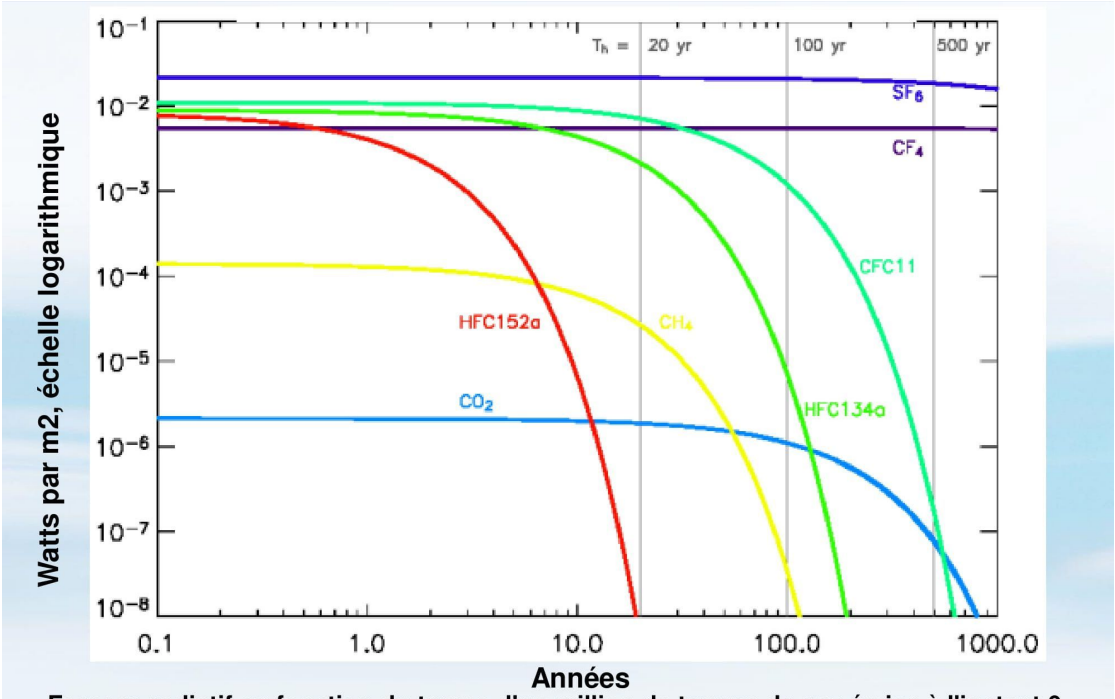
— Réaction endothermique : la photosynthèse, où vous avez besoin d'un photon (besoin d'énergie).

Cette affaire-là va donc s'appliquer à des échelles de temps qui dépassent l'entendement et surtout, qui dépassent le temps caractéristique d'un mandat électoral dans les démocraties et qui dépassent également très largement la stratégie de long terme de votre employeur futur si il est coté en bourse, et du reste même si il n'est pas coté en bourse.

Donc les horizons de temps qui sont en cause dans ce processus – je rappelle ce que j'ai dit au début – ils ne sont pas accessibles à vos sens. Ce sont des moyennes tout ça.

Eh bien le temps caractéristique de ce processus va très, très au-delà du temps caractéristique des modes de gestion que nous avons démocratisés à la surface de la planète, c'est-à-dire ceux que nous avons rendus courants.

27. Les gaz à effet de serre aiment s'envoyer en l'air… et y rester



Forçage radiatif en fonction du temps d'un million de tonnes de gaz émise à l'instant 0.
D. Hauglustaine, LSCE.

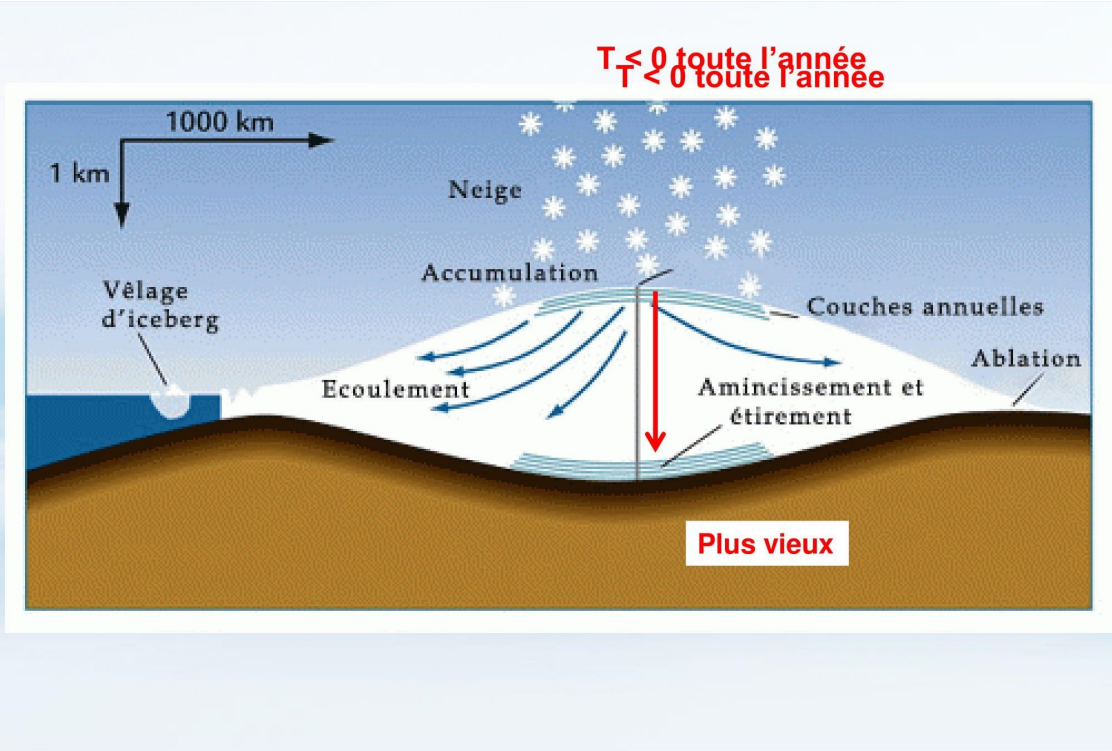
Diapositive 28.

Alors maintenant, il n'y a pas que le CO_2 dans la vie. Il y a d'autres émissions de gaz à effet de serre – je vais y venir. Le CO_2, quand je vous dis « il y a une partie du surplus qui s'en va », en fait il reste pendant un certain temps et après sa concentration diminue de plus en plus fortement.

Vous avez d'autres gaz pour lesquels l'effet radiatif instantané est beaucoup plus fort. Ils peuvent éventuellement rester beaucoup plus longtemps.

Et vous avez un gaz qui est important aussi dans les discussions, c'est le méthane. Le méthane a un forçage radiatif instantané qui est beaucoup plus important. Quand vous mettez un kilo de méthane dans l'atmosphère, ça vous intercepte beaucoup plus efficacement les infrarouges terrestres que quand vous mettez un kilo de CO_2. Par contre, le méthane, lui, a un processus chimique d'épuration de l'atmosphère : il se fait manger par les radicaux hydroxyles. Donc il va y rester moins longtemps. C'est le seul gaz qui a un processus chimique d'épuration de l'atmosphère, pas les autres.

28. Pour savoir ce qui s'est passé, il faut fouiller les archives



Diapositive 29.

À ce stade, on sait – parce que je vous ai montré la courbe tout à l'heure – que la quantité de CO_2 depuis qu'on a des mesures instrumentales (depuis 1958) augmente rapidement dans l'atmosphère. Mais on n'est pas encore capable de comparer ça avec ce qui se passait à des périodes plus anciennes. Pour comparer ça avec des périodes plus anciennes, on va avoir besoin d'aller faire un petit tour aux pôles.

Pourquoi va-t-on faire un petit tour aux pôles ? Parce qu'aux pôles il y a un truc qui nous intéresse beaucoup en tant qu'archives climatiques, ce sont les calottes. Quel est le processus de formation d'une calotte ?

On va prendre l'Antarctique, parce que ce que je vous raconte a cessé d'être vrai pour le Groenland. Sur l'essentiel de la surface de l'Antarctique, vous avez des températures qui sont négatives toute l'année. Ce qui veut dire que quand il y a des précipitations, c'est nécessairement sous forme de neige. Par ailleurs,

des précipitations vous en avez très peu : l'Antarctique étant un endroit très froid, c'est un endroit extrêmement sec. Donc vous avez peu de précipitations chaque année.

Quand la neige tombe année après année, vous avez des précipitations neigeuses et ces précipitations neigeuses, comme elles ne fondent pas, elles vont se tasser à cause du poids des chutes de neige successives. Ce processus de tassement, au bout de quelques siècles, finit par transformer la neige en glace. Donc vous avez un processus de transformation de neige en glace simplement par effet de pression.

Au moment où cette neige se transforme en glace, elle va emprisonner sous forme de petites bulles l'air qui circule entre les flocons. Vous aviez de l'air qui circulait entre les flocons, et dans le processus de tassement, cet air est emprisonné sous forme de petites bulles. Donc vous allez retrouver dans la glace, prisonnière sous forme de petites bulles, l'atmosphère fossile qui date de l'époque de formation de la glace.

Après, cette glace ne reste pas au même endroit. Il se trouve qu'elle va (en règle générale) fluer vers l'océan.

C'est un processus d'accumulation, et sous l'effet de son propre poids – c'est un peu fluide la glace donc ça flue – ça finit quelque temps après (milliers d'années, dizaines de milliers d'années, centaines de milliers d'années, millions d'années) par donner des icebergs.

Quand vous allez bien choisir l'endroit où se trouve le carottage – parce que c'est ça dont on va parler bientôt – il se trouve que vous avez une petite portion de la glace qui flue essentiellement verticalement. Donc elle s'enfonce, sans aller se balader vers les côtes. Ce qui veut dire que si vous allez faire le trou pile au bon endroit, dans un carottage vertical, vous allez au fur et à mesure de la profondeur de la carotte, récupérer de la glace de plus en plus ancienne, avec une atmosphère fossile de plus en plus ancienne.

Vous y trouverez toutes les espèces chimiques contenues dans cette atmosphère qui sont stables une fois que la bulle s'est formée, ce qui est le cas du CO_2. C'est aussi le cas du méthane, parce qu'une fois que le méthane a été retiré du contact avec les radicaux hydroxyles de l'atmosphère, il cesse de disparaître.

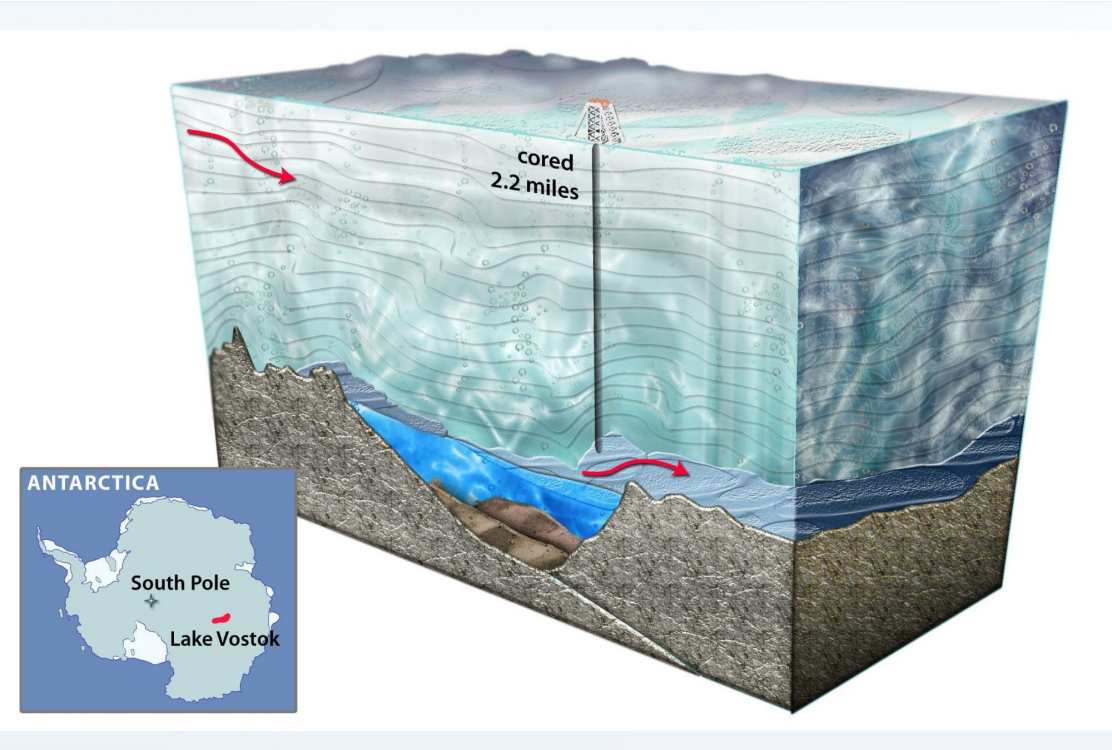
Donc le méthane que vous retrouvez dans les bulles d'air formées dans la glace, il représente la concentration en méthane que vous aviez au moment où la bulle s'est formée – enfin en moyenne sur quelques siècles.

29. Allons à la neige (ou plutôt à la glace)

Diapositive 30.

Alors la manière dont on prélève une carotte, c'est très simple : ici vous avez un carottier.

30. J'fais des trous, des p'tits trous ...



Diapositive 31.

Le carottier, vous le mettez à la surface de la carotte, vous faites un grand forage, donc un grand trou. Vous avez compris au moment du passage sur le pétrole qu'on était les rois des trous, on savait très bien faire ça. Donc vous récupérez une carotte de glace.

31. Le glaçon peut coûter cher . . . mais rapporter gros

Diapositive 32.

Alors voilà à quoi ressemble une carotte de glace, qui est beaucoup plus précieuse évidemment que celle qui finira dans votre whisky. Là on est en train de la sortir du tube, on la coupe en petits morceaux, on étiquette soigneusement les morceaux pour dire à quelle profondeur ça a été prélevé, et on envoie ça au laboratoire.

Je ne sais plus comment il s'appelle maintenant, celui qui est à Grenoble, et qui étudie ce qu'il y a dans les carottes.

Dans les carottes on va trouver deux trucs :

— On va trouver à la fois la glace elle-même, et en analysant la composition isotopique de l'eau – c'est-à-dire la fraction d'oxygène 18 ou la fraction de deutérium dans l'hydrogène de l'eau – on est capable de reconstituer la température planétaire de l'époque. Parce qu'au moment où l'eau s'évapore, vous avez ce qu'on appelle un fractionnement isotopique : plus la température au lieu d'évaporation est chaude, plus la vapeur d'eau em-

porte (en proportion) davantage d'oxygène 18 et de deutérium. Qui ensuite vont précipiter partout dans le monde, y compris en Antarctique, pour former la neige de la calotte. Donc la teneur isotopique en oxygène 18 et en deutérium dans la glace de la calotte, c'est un marqueur de la température planétaire.

— Et vous allez trouver l'air dans les petites bulles.

Et l'air dans les petites bulles va vous marquer la teneur en CO_2, en méthane, en protoxyde d'azote, que vous avez dans l'atmosphère des temps anciens.

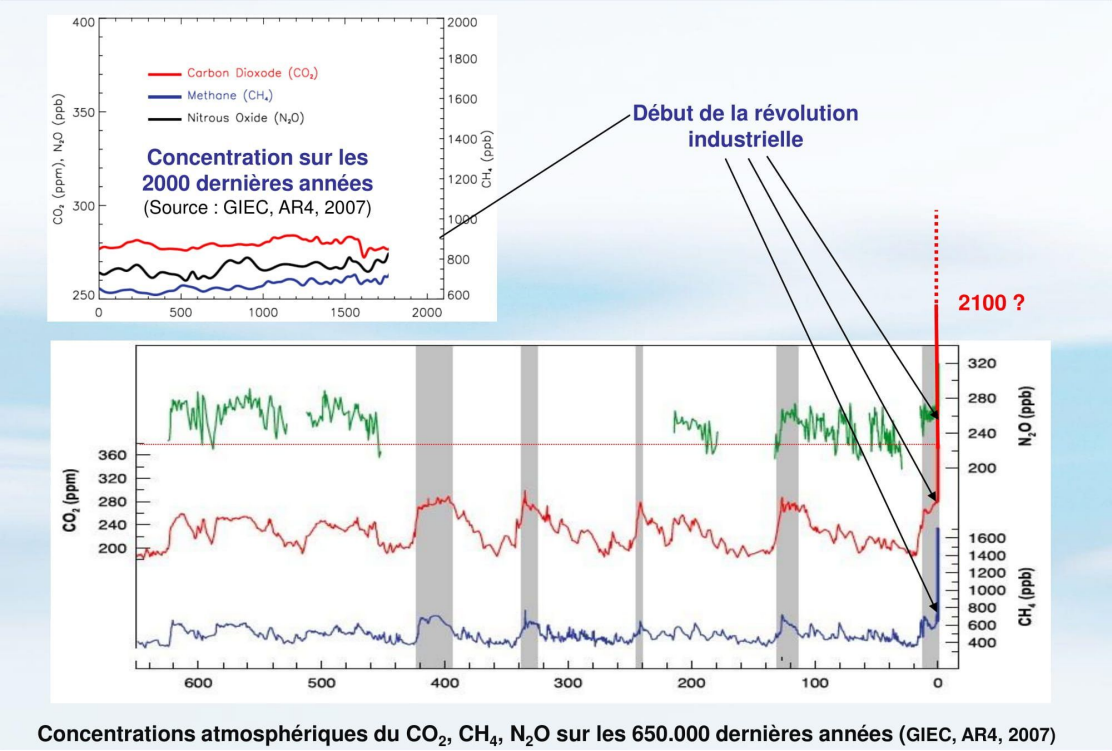
∗ ∗ ∗ Question auditoire ∗ ∗ ∗

Alors comme en Antarctique vous allez trouver de l'eau qui précipite après avoir été évaporée sur toute la surface de l'océan, globalement c'est un marqueur de la température planétaire.

Pour le CO_2, c'est également un marqueur du CO_2 planétaire parce que la durée de vie du CO_2 (d'un surplus de CO_2) dans l'atmosphère se compte en siècles ou en millénaires, alors que le temps de brassage inter-hémisphérique de l'atmosphère, c'est de l'ordre de l'année. En gros, vous émettez du CO_2 absolument n'importe où, les concentrations vont s'homogénéiser très vite.

Et comme en plus, à cette époque-là, vous avez peu de sources concentrées de CO_2 susceptibles de perturber localement la mesure – parce que si vous aviez un volcan juste à côté de la carotte, ça serait un peu embêtant, mais là, en l'occurrence, ce n'est pas le cas – eh bien vous avez un marqueur de la concentration en CO_2 de l'atmosphère dans son ensemble.

32. Émettons, émettons, il en restera toujours quelque chose



Diapositive 33.

Vous pouvez faire ça en Antarctique.

On pouvait faire ça au Groenland pour les temps anciens. Vous ne pouvez plus faire ça au Groenland des temps modernes parce qu'il y a plein d'endroits au Groenland où la neige fond (en surface de la calotte). Et donc à ce moment, évidemment, vous n'avez plus ce phénomène d'accumulation année après année qui vous donne des strates qui sont bien datées dans le temps. Une partie de ce qui tombe ruisselle, fiche le camp ailleurs, etc. Donc ce n'est plus du tout exploitable.

Donc vous avez ici la concentration en CO_2, en méthane et en protoxyde d'azote (pas aux mêmes échelles mais peu importe). Vous voyez que jusqu'au début de l'ère préindustrielle, tout ça est stable. Arrive l'ère industrielle, et vous voyez la concentration qui se met à évoluer de façon extrêmement rapide à la hausse.

On sait aujourd'hui remonter (avec la carotte la plus ancienne – la plus profonde qu'on ait prélevée en Antarctique) à environ 800 000 ans. Donc sur 800 000 ans, on est capable de reconstituer la concentration en CO_2 et en méthane que vous avez là. Et je vous ai mis à l'échelle les surplus de concentration que nous avons déjà créés en l'espace d'un siècle et demi ou deux siècles.

Vous voyez qu'à l'échelle des temps géologiques, les variations climatiques ont engendré (ou sont allées de pair avec) des variations de gaz à effet de serre. Là en l'occurrence, c'est plutôt les forçages astronomiques qui changent la température sur Terre. Et ça, ça change la concentration d'équilibre des gaz à effet de serre – j'y reviendrai au prochain cours. Donc ça varie un peu, mais vous voyez qu'on est déjà totalement sorti de la variation naturelle avec ce qu'on a rajouté.

Les périodes grisées ici, ce sont les périodes interglaciaires chaudes telles que celle qu'on avait commencé à vivre depuis 10 000 ans. Et vous voyez que ça correspond à des concentrations plus élevées de gaz à effet de serre.

Alors en ce qui concerne le CO_2, c'est le processus de déstockage du CO_2 de l'océan qui est à l'œuvre. L'eau chaude dissout moins bien le CO_2 que l'eau froide. Donc quand vous avez un forçage astronomique qui réchauffe la température de la planète, ça vous réchauffe les océans. À ce moment, les océans dégazent un peu de CO_2 et ça réchauffe encore plus la planète. À un moment, le phénomène finit par s'amortir et s'équilibrer, mais vous avez un phénomène d'amplification. C'est la raison pour laquelle les sorties de glaciation vont beaucoup plus vite que les entrées en glaciation. Parce que vous avez ce phénomène d'amplification, de rétroaction positive.

En ce qui concerne le méthane c'est « plus chaud $\Longrightarrow$ plus humide » – je vous l'ai dit tout à l'heure – puisque c'est un cycle de l'eau qui s'intensifie. Donc plus de zones humides. Et plus d'émissions de méthane, puisque le méthane naturel est essentiellement émis par les zones humides. C'est un marqueur des zones humides puisque pour faire du méthane de manière naturelle, il faut que vous ayez un endroit où la végétation pourrit à l'abri de l'oxygène – typiquement les marécages, etc. Donc plus vous augmentez les zones humides, plus vous augmentez les émissions de méthane.

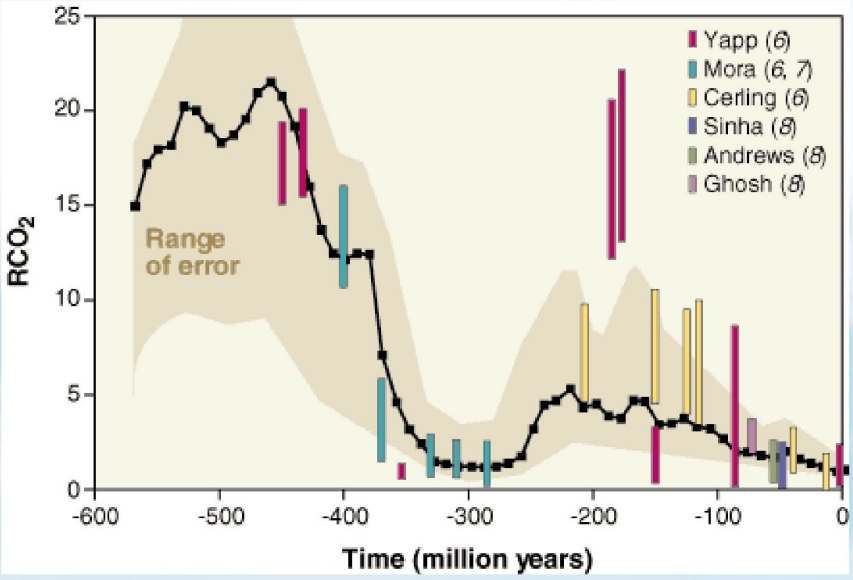
Et la question évidemment est : quelles conséquences pour l'avenir ?

Alors vous voyez qu'avant même de parler d'avenir, la discontinuité que nous avons introduite dans l'atmosphère est extrêmement brutale au regard de ce qui se passe sur les temps géologiques. Et à cause de la durée de vie du surplus de CO_2 dans l'atmosphère, même avec des émissions qui baissent très

fortement demain matin, nous sommes encore très, très loin d'avoir vu la totalité des conséquences de ce que nous avons déjà fait. On n'est pas dans un système instantané dans lequel les conséquences sont immédiatement après les émissions. On verra ça la prochaine fois : ça va s'étaler sur des milliers d'années après les émissions.

Donc la question est : où est-ce qu'on s'arrête ?

33. Plus ou moins de CO_2, c'est naturel aussi ...



Variation de la concentration atmosphérique en CO_2, au cours des 600 millions d'années qui nous ont précédé. Source : Berner, Science, 1997

Diapositive 34.

Ce n'est pas aujourd'hui, et loin s'en faut, la concentration en CO_2 la plus élevée que nous ayons eue dans l'atmosphère planétaire. On a eu des époques géologiques anciennes où la concentration en CO_2 était beaucoup plus élevée qu'aujourd'hui.

Vous avez ici un marqueur de la quantité de CO_2 présent dans l'atmosphère depuis le début de l'ère primaire (exprimé en multiples de la concentration actuelle). Vous voyez qu'il y a des moments où il y a eu 20 fois plus de CO_2, peut-être même 30 il y a longtemps. Mais ces époques-là ont aussi correspondu à des époques où la puissance solaire était plus faible. Et par ailleurs à cette époque-là, il y avait probablement très peu de vie sur les terres émergées. C'est-à-dire que les terres émergées étaient encore essentiellement des déserts et la vie était essentiellement dans l'océan.

Donc, dans le changement climatique dont on parle aujourd'hui, mon avis c'est que la probabilité que le changement climatique cause l'éradication de toute vie sur Terre me paraît assez faible. Ce qui va être en jeu évidemment

c'est : où se déplace le curseur sur les endroits où ça se passe bien et les endroits où ça se passe moins bien ? C'est ça la question. Mais ça ne va évidemment pas supprimer la totalité de la vie sur Terre.

∗ ∗ ∗ Question auditoire ∗ ∗ ∗

Alors la quantité de CO_2, depuis qu'on a des océans, est un peu pilotée par le rayonnement solaire. Puisque quand le rayonnement solaire conservé par la planète – avec la variation de ces paramètres astronomiques – est plus important, les océans se réchauffent et ça dégaze un peu de CO_2.

Donc là, vous avez un processus de pilotage : quand vous avez la végétation qui se porte bien, ce qui s'est passé après l'apparition de la végétation au cambrien, vous avez corrélativement le CO_2 qui baisse. Donc vous avez des processus d'asservissement entre le rayonnement solaire, la quantité de végétation et le CO_2 dans l'air.

Mais ce qui est important dans ce que je suis en train de vous raconter, c'est la vitesse à laquelle le processus évolue. C'est une affaire de vitesse cette histoire.

Pour reprendre, et on en parlera au moment des conséquences : si vous rentrez dans un mur à $3\,\mathrm{km\,h^{-1}}$, vous avez une bosse. Si vous y rentrez à $100\,\mathrm{km\,h^{-1}}$, vous êtes mort.

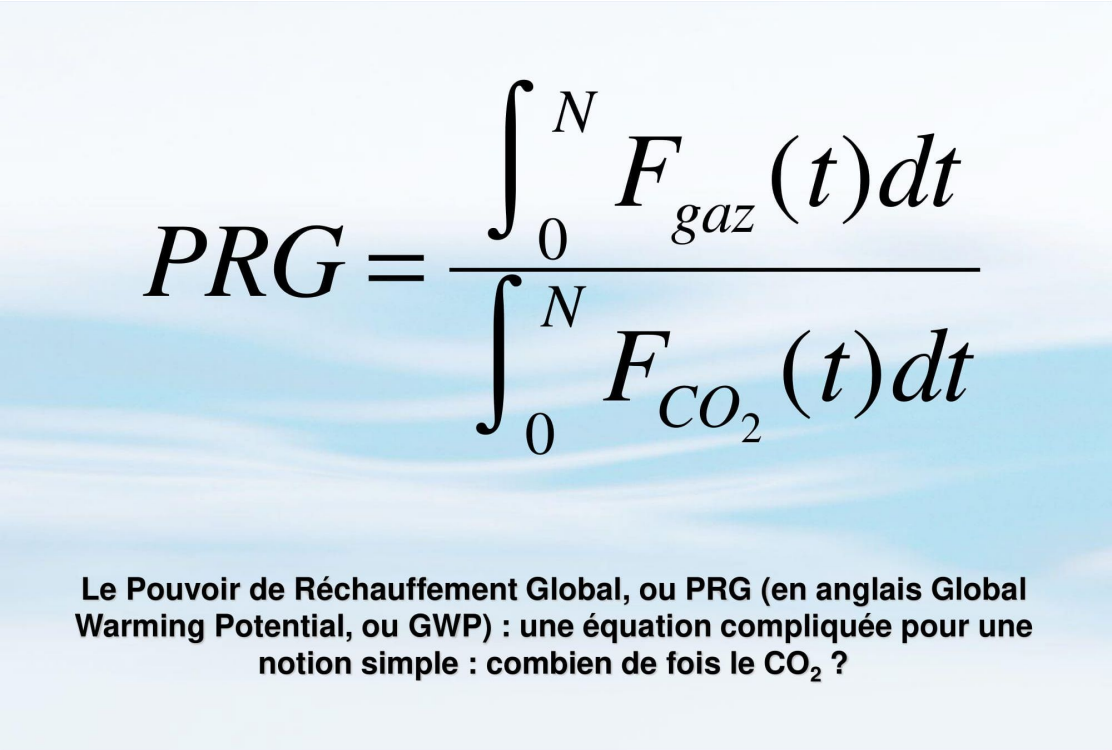
Donc là, on parle exactement de la même chose :

— Il y a des déplacements du système qui ne sont pas gênants parce qu'ils sont faits sur des durées lentes et donc il y a des adaptations possibles.

— Il y a des déplacements du système qui sont plus enquiquinants parce qu'ils se font sur des durées qui sont trop courtes pour que le système puisse s'adapter dans de bonnes conditions.

Et malheureusement, on est parti sur la 2e option. C'est ça qui est ennuyeux. C'est pour ça qu'il faut y passer 5 heures.

34. Comparer les gaz, comment on fait ?



Diapositive 35.

Nous n'avons pas que le CO_2 dans les gaz à effet de serre.

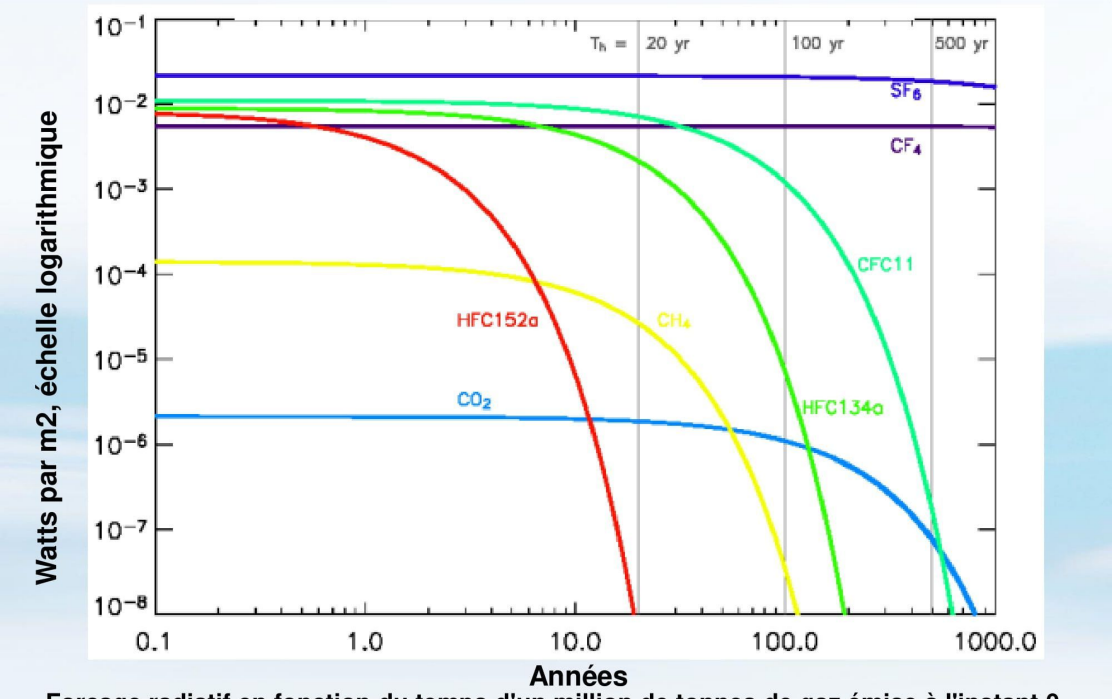
Une fois qu'on sait qu'on n'a pas que les gaz à effet de serre dans l'affaire, pour ceux d'entre vous – c'est à dire normalement tout le monde si la collectivité fait bien son travail – qui vont un peu s'intéresser à la question du changement climatique dans leur métier futur – parce que comme c'est un truc transversal, il faut que tout le monde s'y intéresse un peu – vous allez avoir besoin d'une métrique. Car il n'y a pas qu'un seul gaz à effet de serre.

S'il n'y avait qu'un seul gaz à effet de serre ça serait simple : la métrique, c'est le poids de CO_2. On a que du CO_2, on mesure en poids de CO_2, et c'est plus grave d'émettre 3 kilos que d'émettre 1 kilo. Mais comme on a plusieurs gaz à effet de serre, du méthane, du protoxyde d'azote, etc., est-ce plus grave d'émettre 1 kilo de méthane ou d'émettre 1 kilo de CO_2 ?

Si mon patron me dit : « tu as 1000 euros pour réduire quelque chose » et que j'ai la possibilité de réduire le méthane de 3 % ou le CO_2 de 10 %, qu'est-ce que je choisis ?

Eh bien vous ne savez pas répondre à cette question tant que vous n'avez pas une unité de comparaison, une monnaie, c'est-à-dire quelque chose qui vous permet de dire : ça c'est X fois plus grave ou X fois moins grave que le CO_2. Alors cette monnaie s'appelle le PRG. Le PRG ça veut dire le « Pouvoir de Réchauffement Global ». C'est le forçage radiatif cumulé que va vous amener une unité de gaz à effet de serre supplémentaire dans l'atmosphère. Et plutôt que de regarder en absolu, on a choisi que cette unité soit une unité relative. Donc c'est en fait le rapport entre le forçage radiatif cumulé d'une unité de gaz à effet de serre sur une durée donnée, sur le forçage radiatif sur la même durée, du même poids de CO_2. Ce qui veut dire que par convention, le PRG du CO_2 vaut 1 quel que soit l'horizon de temps concerné.

Cette unité dépend de l'horizon de temps et elle dépend du forçage radiatif. Alors je vais revenir à la courbe que je vous ai montrée tout à l'heure.



Forçage radiatif en fonction du temps d'un million de tonnes de gaz émise à l'instant 0.
D. Hauglustaine, LSCE.

Diapositive 28.

Vous voyez que si je prends par exemple ce gaz-là (qui est un halocarbure) et que je borne mon horizon de temps à une année, je vais avoir un rapport (comme l'échelle est logarithmique) 10, 100, 1000, 10 000 fois ça : le PRG de ce truc-là va être 10 000 fois supérieur au PRG du CO_2. Mais si je borne mon

horizon de temps à 1000 ans, ce truc-là se sera épuré beaucoup plus vite que le CO_2, et donc mon rapport d'intégrales sur un horizon de temps donné va avoir une valeur extrêmement différente.

Donc il y a un débat, qui peut vous paraître un débat un peu technique, soporifique, tatillon, qui est : « Quelle est la bonne échelle de temps ? »

Ce n'est pas du tout un débat tatillon. En particulier pour le méthane (qui est, à 1 siècle, 25 fois plus nocif que le CO_2, mais à 20 ans, il est 80 fois plus nocif que le CO_2), je prends 20 ans ou je prends 1 siècle ?

— Si je prends 20 ans, la Nouvelle- Zélande qui émet plein de méthane parce qu'elle a plein de moutons et de vaches se met à hurler. Pareil pour les pays qui cultivent du riz.

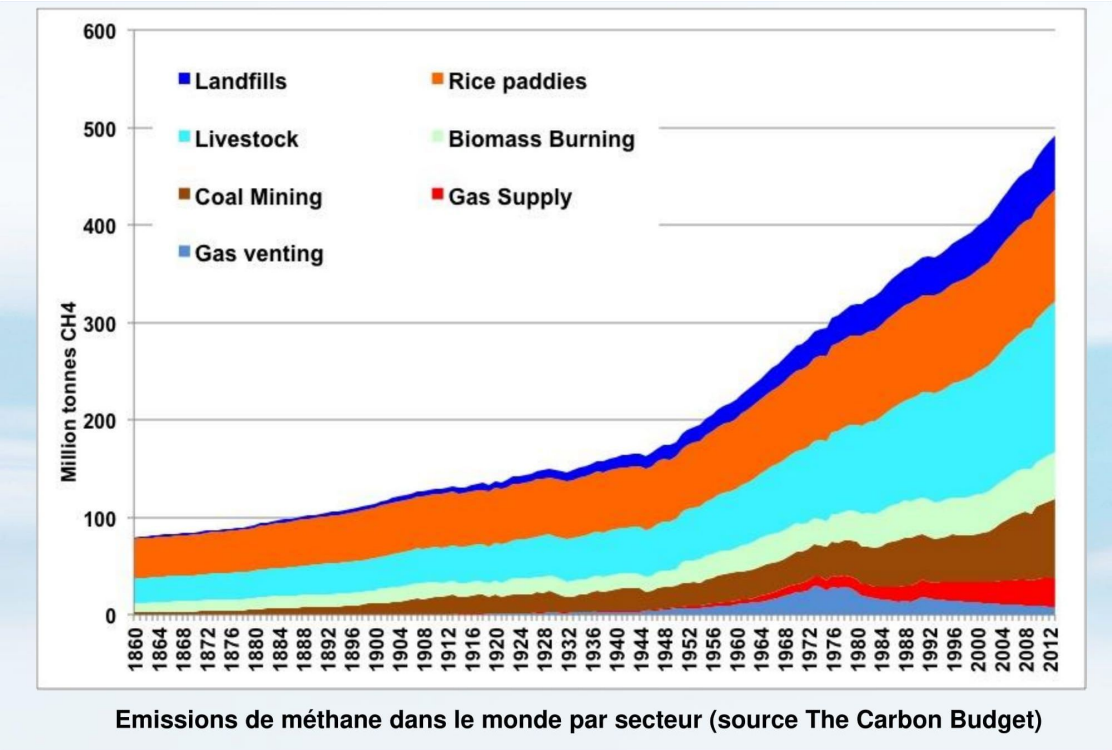
— Si je prends 1 siècle, c'est les pays qui ont plus de CO_2 dans leur inventaire d'émissions qui se mettent à hurler en disant qu'ils sont désavantagés.

Donc vous voyez que ce sujet-là, qui peut paraître comme un peu technique et anecdotique, pilote en fait la façon dont on va répartir la charge de l'effort en fonction des sources d'émission.

∗ ∗ ∗ Question auditoire ∗ ∗ ∗

Parce que la culture du riz émet du méthane. Une rizière, c'est un marécage artificiel. Donc vous avez des débris organiques qui se décomposent à l'abri de l'oxygène de l'air, donc vous avez une décomposition anaérobie qui vous émet du méthane. Toutes les décompositions anaérobies émettent du méthane. C'est le même principe aujourd'hui dans les méthaniseurs dont vous avez peut-être entendu parler. On fait exactement la même chose : on met de la matière végétale à l'abri de l'oxygène de l'air, qu'on fait manger à des bactéries primitives qui s'appellent des archées, qui vous émettent du méthane.

35. Vaches qui rotent et pètent émettent tripette



Diapositive 36.

Voilà le méthane justement. J'aurais dû vous dire « slide suivante ». Donc on va pouvoir comparer les émissions de gaz à effet de serre. Par exemple, les émissions de méthane. Pour le moment, je les compte en tonnes de méthane ou plus exactement en millions de tonnes de méthane.

Alors d'où sort le méthane ? Vous l'avez ici.

Ça, c'est la distribution de gaz : ce sont les fuites dans les réseaux de gaz. Parce que le gaz naturel, c'est du méthane. Ça, ce sont les mines de charbon. Donc *confer* ce que je vous ai dit la dernière fois : quand on forme une veine de charbon (il y a du méthane qui est absorbé sur le charbon) et quand on mine le charbon, on émet du méthane dans l'atmosphère. Parce qu'on ventile les mines pour éviter les coups de grisou.

Ensuite, au-dessus, vous avez la combustion de la biomasse. Alors pourquoi la combustion de la biomasse émet-elle du méthane ? Parce que le méthane est un élément volatile qui se forme quand le bois, prend feu, et une partie de ce

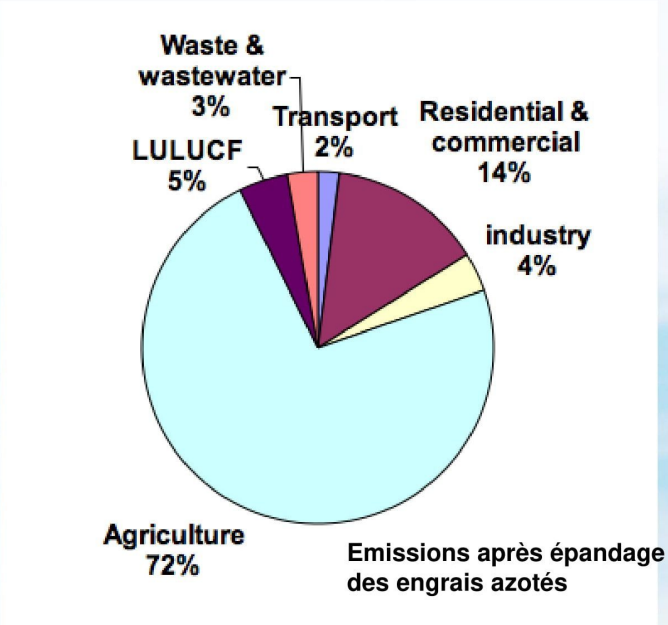
méthane n'est pas brûlée au moment où la combustion a lieu. Donc il part dans l'atmosphère.

Au-dessus, vous avez « livestock », c'est le cheptel bovin, enfin ce sont les ruminants. Et là-dedans, vous avez essentiellement des vaches. Vous avez un milliard et demi à deux milliards de vaches sur Terre. Les vaches représentent la première biomasse des mammifères sur Terre, devant les Hommes. Et les vaches rotent du méthane. Elles le pètent très peu, je précise. Pourquoi est-ce qu'elles rotent du méthane ? Parce que les vaches sont supérieures à vous et à moi : elles ont quatre estomacs au lieu d'en avoir un. Et dans ces estomacs vous avez un processus complexe de fermentation anaérobie – donc en l'absence de l'oxygène de l'air. Et dans ce processus de fermentation anaérobie, vous avez du méthane qui se forme et qui ressort par les voies supérieures, ce qui contribue aux émissions de gaz à effet de serre.

Donc ici vous avez les rizières (« rice pannies ») – c'est le processus que j'évoquais tout à l'heure : c'est la décomposition à l'abri de l'oxygène de l'air.

Et ici vous avez « landfills », ce qui en français veut dire « décharges ». Pourquoi avez-vous des émissions de méthane dans les décharges ? Même motif, même punition : parce que dans les décharges, vous avez notamment des déchets organiques (vos épluchures de patates, enfin pour ceux d'entre vous qui épluchent des patates). Donc, quand ça arrive dans une décharge, les déchets s'empilent les uns sur les autres et une partie de ces déchets vont fermenter à l'abri de l'oxygène de l'air et donc émettre du méthane. Aujourd'hui, dans l'essentiel des décharges des pays occidentaux, ce méthane est capté. Mais ce n'est pas partout le cas dans le monde.

36. Un gaz hilarant qui ne l'est plus tellement



Répartition des émissions de N_2O dans le monde par secteur, 2004 (source IPCC)

Diapositive 37.

Un autre gaz à effet de serre dont je vous ai parlé, c'est le protoxyde d'azote. Alors le protoxyde d'azote – même si ce camembert est un peu ancien, il est toujours valable dans ses causes et dans ses ordres de grandeur – est issu des processus de combustion.

La combustion est un processus dans lequel vous oxydez quelque chose avec de l'oxygène de l'air. Mais en général cet oxygène de l'air, vous ne l'amenez pas pur là où ça brûle. Vous l'amenez avec l'azote de l'air, et donc le processus de combustion va réarranger l'azote et l'oxygène sous forme d'oxyde d'azote. Donc les oxydes d'azote de la pollution automobile (dont vous entendez peut-être parler), c'est tout simplement l'azote qui est rentré dans le moteur, qui s'est retrouvé dans la chambre de combustion du moteur, qui s'est recombiné à de l'oxygène, et qui ressort sous forme d'oxyde d'azote. Et une partie de ces oxydes d'azote, c'est du protoxyde (une petite partie). C'est la même chose dans l'industrie, dans le transport, dans les chaudières de bâtiments.

Vous avez une cause essentielle qui est l'agriculture. Pourquoi avez-vous des émissions de protoxyde d'azote en agriculture ? Parce que l'agriculture utilise des engrais qui contiennent des molécules azotées. C'est ça un des apports des engrais : des molécules azotées. Qui quand vous les épandez sur le sol – et ça marche avec les engrais de synthèse, le lisier des cochons, ou le purin des vaches – il y a une petite partie des molécules qui vont former du protoxyde d'azote sous l'effet de l'action microbienne des sols.

Donc ça, ce sont des émissions des sols liés à l'épandage des engrais azotés.

37. Chaîne du froid et mauvaises odeurs sous le bras…

Les halocarbures

La première famille - désormais interdite de production - est mondialement connue : les CFC. Leur premier usage a été le remplacement de l'ammoniac dans les circuits réfrigérants, puis ils ont servi comme gaz propulseurs, solvants, expanseurs de mousses plastiques…

Désormais interdits de production, les CFC ont été remplacés par des substituts aux doux noms de HFC, HCFC, PFC…

Ces gaz servent - toujours - dans les circuits de fluide réfrigérants, mais aussi comme gaz propulseurs, de gaz expanseurs (industries des mousses plastiques), de solvants (semi-conducteurs), et viennent parfois de manière « indésirables » de certains procédés industriels (par exemple électrolyse de l'alumine

Diapositive 38.

Après vous avez des molécules dites d'halocarbures. Comme je vous l'ai dit tout à l'heure, ce sont des molécules qu'on a fait en remplaçant, dans les hydrocarbures, de l'hydrogène par des halogènes.

Pourquoi s'est-on amusé à faire ça ?

Tout simplement parce que la liaison C-halogène est une liaison qui est extrêmement stable. Ce qui veut dire que quand vous faites ce genre de composé, en particulier quand ils sont saturés, vous faites des molécules qui sont quasi-indestructibles et donc qui ne sont pas toxiques.

Ce sont des molécules qui ont remplacé d'autres usages, à cause de leurs propriétés physiques intéressantes, là où avant on utilisait des gaz qui eux étaient potentiellement toxiques ou agressifs. Dans les chaînes du froid, ça a remplacé le CO_2 qu'on utilisait à un moment (qui était un peu moins bon sur le plan thermodynamique), et puis surtout l'ammoniac. Je ne sais pas si certains d'entre vous se sont déjà amusés à respirer une grande bouffée d'ammoniac, mais ce n'est pas terrible.

Donc on a préféré mettre, dans les circuits frigorigènes, des molécules de gaz halogénés. Parce que si vous en respirez un grand coup, il vous arrive essentiellement *rien*. C'est totalement inerte.

Pareil pour les gaz propulseurs des bombes aérosols : on a utilisé ces gaz à la place des hydrocarbures qu'on utilisait avant, et qui, quand j'étais enfant, faisait rire les enfants avec la flamme. Ça vous faisait un grand chalumeau, et comme il y a quelques enfants à qui cela a explosé à la figure, on a remplacé ça par un truc qui ne brûlait pas.

Ça a également servi de gaz expanseur de mousse. Donc si vous avez un vieux frigo des années 50 qui traîne dans votre cave : la mousse isolante du frigo a été faite avec un gaz comme ça, qui a servi de gaz expanseur. Votre mousse est truffée d'halocarbures donc si vous détruisez la mousse et que vous exposez ça à l'air, ça part dans l'atmosphère et ça augmente l'effet de serre. Et enfin, ça sert également de solvant dans l'industrie des semi-conducteurs.

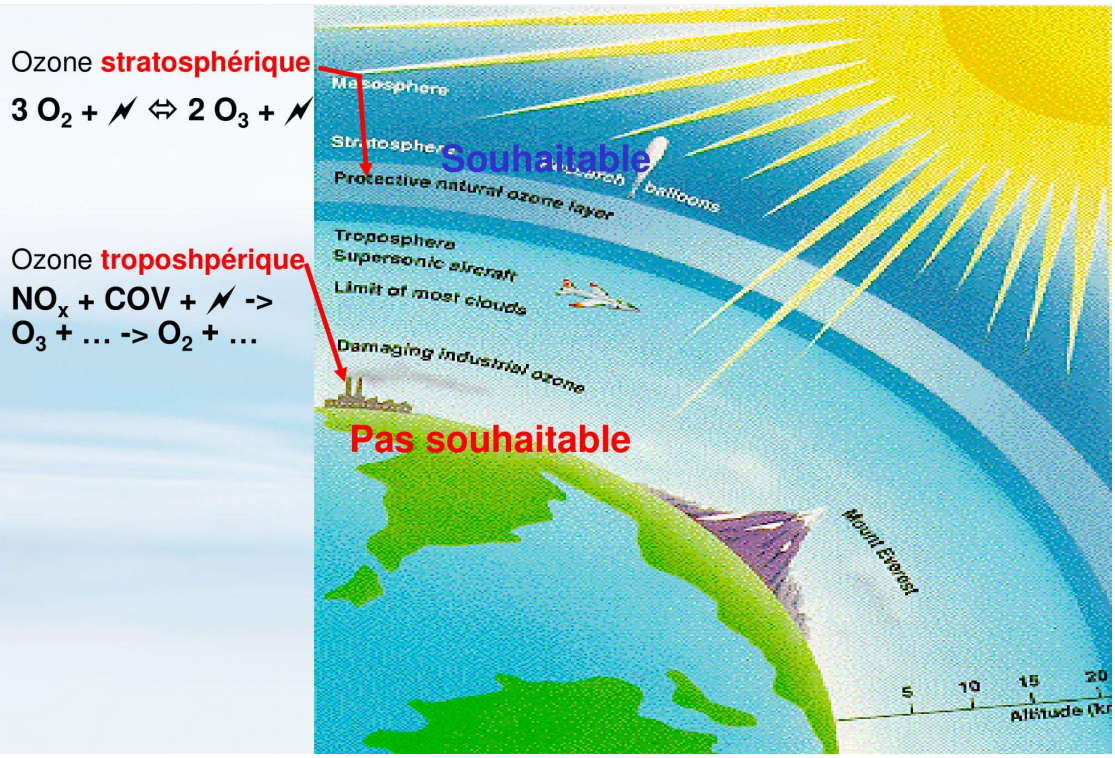
Le plus dangereux de ces halocarbures pour la couche d'ozone, qui s'appelait le CFC, a depuis été éradiqué. Le CFC était une molécule très stable, comme toutes les autres. Chloro-Fluoro-Carbures : que du chlore, du fluor et du carbone. Mais comme c'était très stable, ça avait le temps de monter dans la haute atmosphère sans être agressé par quoi que ce soit sur le plan chimique. Dans la haute atmosphère, c'est dissocié par les ultraviolets durs, et le chlore libéré par cette réaction agresse l'ozone stratosphérique.

Donc on a supprimé la production. On n'a pas supprimé les émissions, parce que vous avez des CFC qui ont été utilisés précisément comme gaz expanseur de mousse et donc ils sont encore dans des vieux frigos qui continuent d'être démantelés aujourd'hui. Donc on ne l'a pas complètement supprimé. Et puis il y a un certain nombre de pays qui en ont fait un peu en douce.

On a remplacé ça par d'autres gaz qui ont à peu près les mêmes propriétés thermodynamiques dans les chaînes du froid, mais qui ne sont pas agresseurs de la couche d'ozone. Par contre, ce sont des gaz à effet de serre extrêmement puissants.

Donc vous avez toujours des gaz de cette nature, mais les émissions aujourd'hui sont quand même beaucoup plus faibles que ce qu'elles étaient dans les années 50.

38. Ozone des villes et ozone d'en haut



Diapositive 39.

Vous avez un autre gaz à effet de serre qui n'a pas d'émissions directes, qui est l'ozone.

L'ozone se trouve à deux endroits. Vous en avez *dans la haute atmosphère*, et celui-là nous intéresse énormément. Il nous intéresse à double titre :

— Il intercepte les ultraviolets durs du soleil, ce qui nous intéresse parce que sinon ces ultraviolets durs gêneraient la vie telle qu'on la connaît sur Terre.

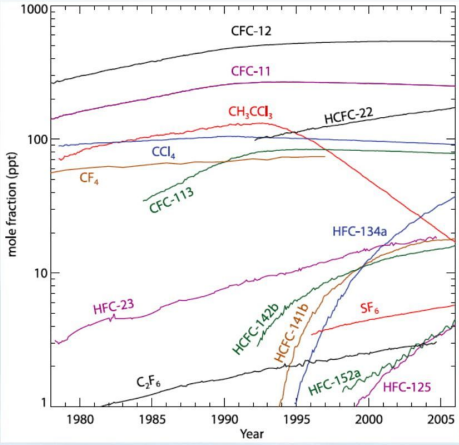
— Il a un deuxième effet qui est beaucoup plus méconnu. Comme il absorbe de l'énergie dans la haute atmosphère, il réchauffe donc la haute atmosphère, et il crée ce qu'on appelle une inversion de température. C'est-à-dire que la température qui (par effet thermodynamique de base) diminue quand la pression diminue – donc quand on monte – jusqu'à la tropopause – c'est-à-dire jusqu'à la limite de la stratosphère – se met à se réchauffer quand on rentre dans la stratosphère. Et alors cette inversion de tempé-

rature a quelque chose d'absolument fondamental, c'est qu'elle limite la convection de la vapeur d'eau à la limite, à la tropopause. Si cette inversion de température n'avait pas lieu, la vapeur d'eau ne s'arrêterait pas à 15 km du sol. Elle continuerait à monter plus haut, ce qui serait un peu gênant pour les précipitations. Par ailleurs, la vapeur d'eau serait exposée elle aussi aux ultraviolets durs du soleil, qui auraient depuis longtemps dissocié l'eau en oxygène – qui serait resté sur Terre – et hydrogène – qui serait parti dans l'espace, parce que la molécule est trop volatile. Donc l'eau qui est arrivée sur Terre, si la couche d'ozone n'avait pas créée cette inversion de température, aurait disparu. C'est également absolument crucial pour le maintien de la vie sur Terre.

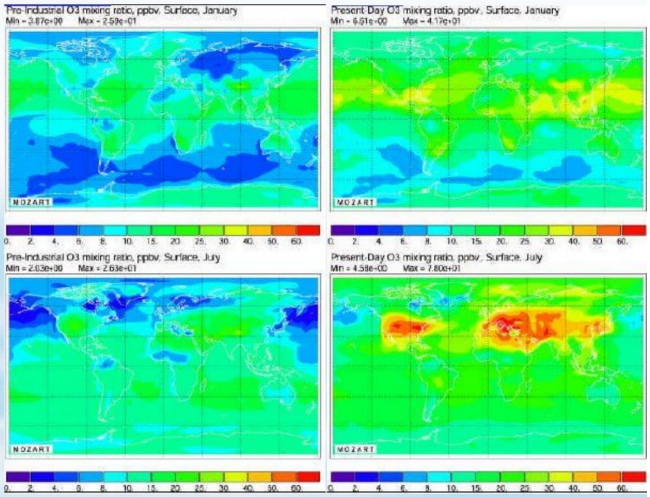
L'ozone stratosphérique est formé par interaction de l'oxygène atmosphérique avec les ultraviolets. Il a son propre cycle et il ne bouge pas de la stratosphère. Et encore une fois, on l'aime beaucoup à cause des deux effets que je viens d'évoquer.

Plus près du sol, vous avez de l'ozone troposphérique : de l'ozone qui apparaît près du sol. Celui-là nous intéresse beaucoup moins car il n'apparaît pas du tout pour les mêmes raisons. Il apparaît parce qu'on joue au petit chimiste (en gros). On met dans l'atmosphère tout un cocktail de pollutions : des oxydes d'azote, des composés organiques volatils, etc. On touille tout ça avec un peu de rayonnement solaire – il faut un peu de rayonnement solaire – et voilà : vous avez de l'ozone qui apparaît. Mais celui-là on ne l'aime pas du tout, parce qu'il rentre dans nos poumons et qu'il participe à l'effet de serre. Donc on préfèrerait ne pas le voir.

39. Et tout cela s'accumule aussi dans l'atmosphère



Concentration atmosphérique de divers gaz halogénés (attention ! Échelle logarithmique : une droite ici = une exponentielle « en vérité »). GIEC, 4è rapport d'évaluation, 2007



Concentration moyenne d'ozone près du sol à l'époque pré)industrielle (à gauche) et actuellement (à droite), en janvier (en haut) et en juillet (en bas).

Source : Didier Hauglustaine, conférence AFITE/LSCE d'octobre 2003 au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement

Diapositive 40.

Ces cartes-ci vous montrent que la concentration d'à peu près n'importe quoi sur les halocarbures a fortement augmenté au cours des dernières décennies.

Et ici, ces cartes vous comparent la concentration de fond en ozone. Et vous voyez qu'elle a extrêmement fortement augmenté : bien que l'ozone soit un oxydant très agressif – c'est-à-dire que sa durée de vie dans l'atmosphère est courte, parce que dès qu'il est formé il trouve quelque chose à manger et il se jette dessus –, comme on continue à en produire en permanence, vous avez une concentration de fond en ozone qui est en permanence au-dessus de nos têtes (plus ou moins élevée, mais en permanence).

À noter également : l'ozone est un inhibiteur de croissance pour les plantes.

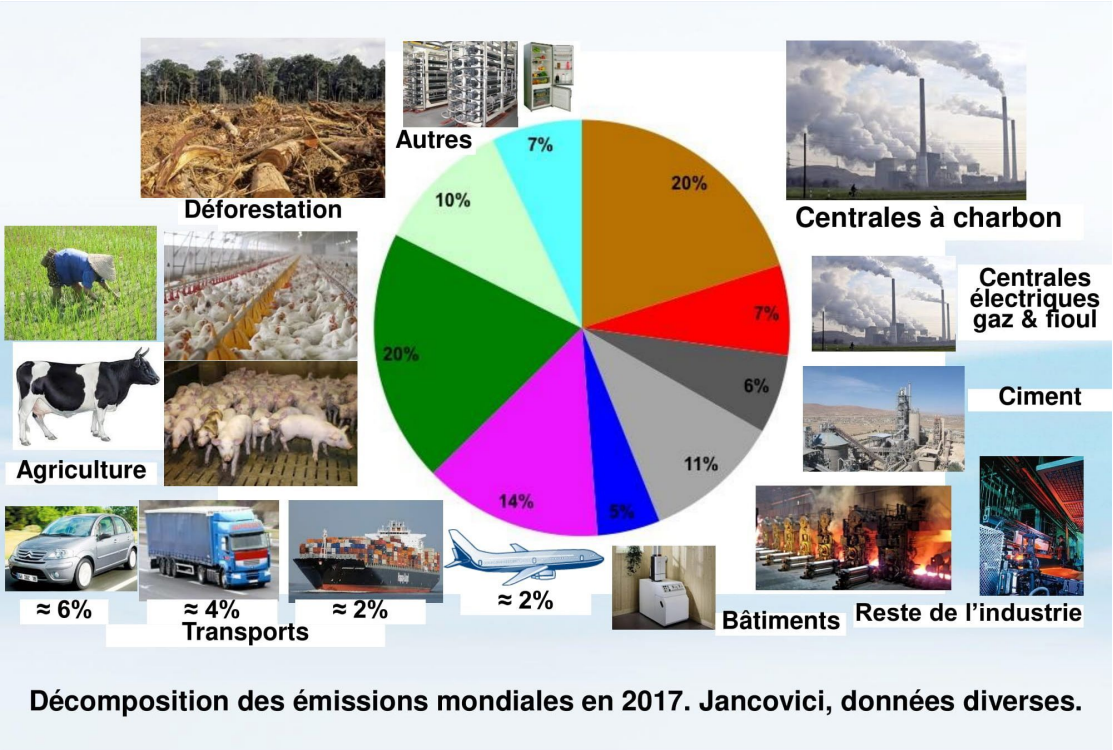
Comme il faut du temps pour que l'ozone se forme, en région parisienne par exemple, ce n'est pas là où vous avez la circulation routière que vous avez le maximum de la concentration en ozone. En général le maximum de la concen-

tration en ozone, c'est toujours un peu sous le vent de l'agglomération : à 10, 20, 30 km. Ce n'est jamais pile dans Paris. C'est un inhibiteur de la croissance des plantes.

∗ ∗ ∗ Question auditoire ∗ ∗ ∗

Parce que c'est un inhibiteur de la croissance des plantes. Puisque c'est un effet constaté. Vous savez, le « pourquoi », c'est toujours un « comment » qui se ramène au « pourquoi » de la fois d'avant. En fait ça inhibe je ne sais quelle réaction dans la photosynthèse, ce qui en fait un inhibiteur de la croissance.

40. Bref, l'ensemble donne quoi ?



Diapositive 41.

Une fois qu'on a l'élément de comparaison sur les gaz entre eux, on va pouvoir commencer à représenter les émissions de gaz à effet de serre sous forme de camemberts. Les camemberts, il y en a plein. Vous pouvez représenter par gaz, par source, par pays, tous gaz confondus, etc.

Je vais vous proposer un certain nombre de camemberts et je ne vais paradoxalement pas commencer par le camembert dans lequel il y a les gaz les uns par rapport aux autres. Je vais commencer par un camembert dans lequel j'ai attribué les émissions de gaz à effet de serre, tous gaz confondus (donc à la fois le CO_2, le méthane, etc.), à un certain nombre de secteurs d'activité. La totalité des activités fait 100 % de ce qu'on fait, et je décompose ça d'une façon que j'espère parlante.

Les centrales à charbon

Méthane émis par les mines de charbon inclus – donc c'est vraiment une vue globale –, *les centrales à charbon représentent aujourd'hui dans le monde 20 % des émissions planétaires*. Tous les gaz sont ramenés au CO_2 avec le PRG à 100 ans. Tous les autres gaz se comptent en équivalent-CO_2. Autrement dit : une tonne équivalent-CO_2 sur cinq émise dans le monde vient d'une centrale à charbon ou de sa chaîne d'approvisionnement. *Une sur cinq !*

Les centrales à gaz et à fuel

Après, vous avez des centrales à gaz et à fuel (essentiellement à gaz) qui représentent de l'ordre de 7 % des émissions planétaires (en incluant les émissions de méthane qui sont occasionnées par la chaîne gazière à l'avant).

Les cimenteries

En rajoutant les combustibles utilisés par les cimenteries, la production de ciment c'est 6 % des émissions planétaires. Retenez que les émissions françaises c'est 1 % si vous voulez avoir une base de comparaison pour tout ce que je suis en train de vous raconter – ça vous donnera une petite idée.

L'industrie

Le reste de l'industrie, c'est 12 %. Là-dedans ce sont les émissions directes, sans compter les émissions de la production électrique utilisée par l'industrie. Si on rajoute la production électrique utilisée par l'industrie, la part de l'industrie passe, en incluant les cimenteries, de 18 % à quelque chose entre 25 % et 30 %. Parce qu'une bonne partie de l'électricité passe évidemment dans le processus industriel. Donc là vous avez 12 % dans lesquels les aciéries représentent environ 4 %. Sachant qu'environ la moitié de l'acier produit dans le monde sert à faire des bâtiments et des infrastructures comme des ponts, etc., et que la totalité du ciment sert à faire ça.

Ça veut dire qu'en gros, *construire des bâtiments et des ponts sur Terre, c'est un petit 10 % des émissions planétaires*. Là vous retrouvez aussi un élément de croissance démographique : s'il y a plus de monde, on fait plus de bâtiments.

Le chauffage des bâtiments représente 6 % des émissions. Alors vous allez me dire « Comment ? Seulement 6 % des émissions ? Alors que tout à l'heure, on a

vu sur le graphique de la France que, etc. » Oui, seulement 6 % des émissions. Pourquoi ? Parce qu'une bonne partie des bâtiments dans le monde n'ont pas besoin d'être chauffés :

— Si vous avez un bâtiment dans le Sud de la Californie, son problème n'est pas vraiment d'être chauffé.

— Si vous avez un bâtiment à Singapour : son problème n'est pas vraiment d'être chauffé.

— Si vous avez un bâtiment à Lagos, son problème n'est pas vraiment d'être chauffé.

Son problème par contre est éventuellement d'être climatisé, et dans ce cas les émissions de la climatisation ne sont pas là parce que ce n'est pas une chaudière. Vous les retrouvez là et là, puisque ce sont des émissions de la production électrique. Mais sur le chauffage direct, une bonne partie des bâtiments dans le monde n'en a pas besoin. Ensuite, en France, cette part-là n'est pas très importante parce qu'on a très peu de centrales à charbon.

La part ici est plus faible parce qu'on a fini de construire nos infrastructures et on construit à un rythme moins effréné que dans les pays à forte croissance démographique. Donc la part des cimenteries est plus faible, etc.

Et par un effet de parts de camembert plus petites à un certain nombre d'endroits, les autres parts sont corrélativement plus grosses. Mais c'est juste pour montrer que les parts peuvent varier beaucoup en fonction des pays.

Les transports

Cette très belle part rose, ce sont les transports. Dans les transports :

— La flotte mondiale de voitures pèse aux alentours de 6 % – alors quand je dis 6 % c'est peut-être 7 %, mais c'est de cet ordre de grandeur-là.

— La flotte mondiale de camions aux alentours de 4 %.

— La flotte mondiale de bateaux est aux alentours de 2 % .

— La flotte mondiale d'avions est aux alentours de 2 % aussi, hors gaz hors CO_2 mais je n'ai pas le temps d'en parler pendant ce cours, donc retenez 2 %.

Ce que vous voyez donc à ce stade, c'est que par exemple, dans les usages de type machine, le parc mondial de cimenteries c'est le même problème que le

parc mondial de voitures. Donc on n'est pas en train de parler de quelque chose d'anecdotique. Le parc mondial d'aciéries, c'est le même que le parc mondial de camions. Vous voyez également que pour les centrales à charbon, c'est plus important que la totalité des moyens de transport dans le monde si on regarde les émissions.

Donc vous commencez à avoir une base de comparaison qui vous dit, si vous avez envie de vous occuper du problème, par où il faut commencer. Et vous voyez que ce n'est pas juste « on va supprimer les voitures et on s'arrête là ». Parce que le problème est plus compliqué que ça.

L'alimentation

20 % de nos émissions c'est le fait de manger. Ce sont essentiellement des gaz hors CO_2. Vous retrouvez là-dedans les vaches, le reste du cheptel ruminant (qui est moins important), les rizières, le protoxyde d'azote des champs, et également le CO_2 des tracteurs mais qui est totalement minoritaire.

La déforestation

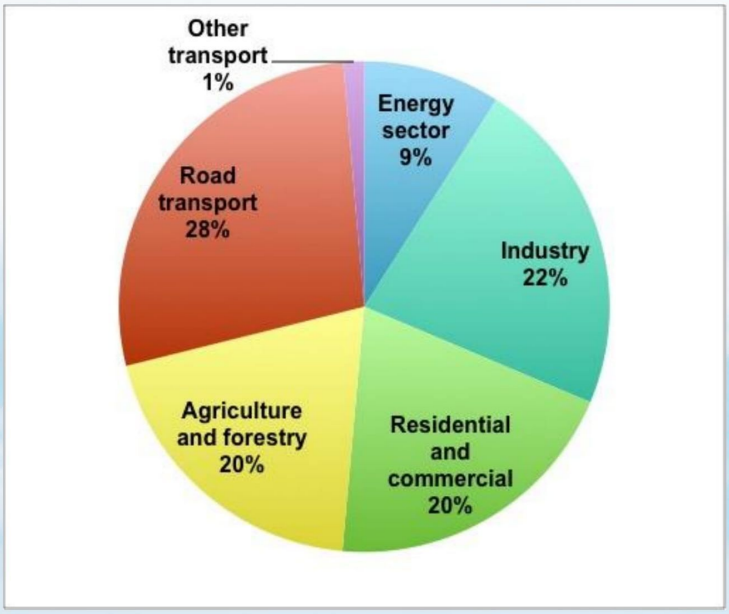
Après il y a la déforestation. La déforestation est un processus amont de l'activité agricole. Ce qui veut dire que le fait de manger, au sens large, c'est plutôt 30 % des émissions planétaires.

Les émissions diverses

Et enfin, on trouve ici diverses choses dont par exemple, la gestion des déchets, les fuites de chaîne du froid, etc. Tout un tas de petites choses diverses et variées.

C'est une manière de présenter les émissions de gaz à effet de serre. Je vous les ai présentées par grands ensembles d'émissions directes.

41. Et quid de la Gaule ?



Répartition des émissions brutes françaises 2015 (tous gaz à effet de serre pris en compte) par secteur (source CITEPA)

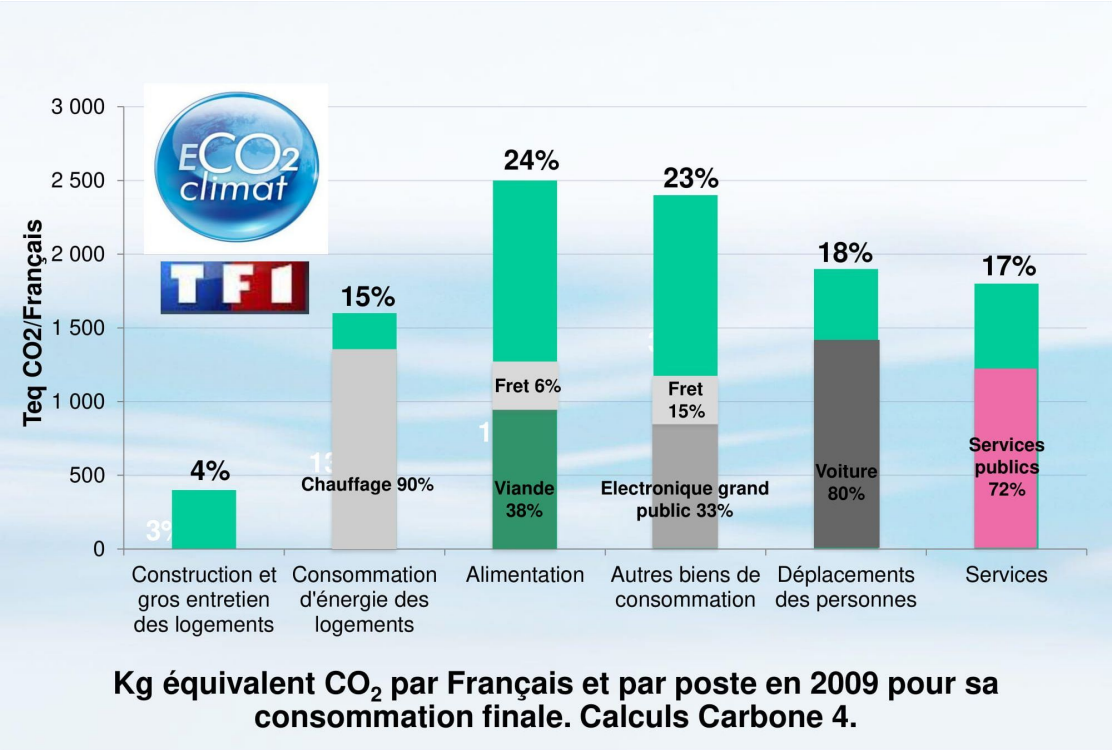
(*) hors transports maritimes et aériens internationaux

Diapositive 42.

En France, voilà à quoi ça ressemble. On voit qu'on retrouve les mêmes parts de camembert mais pas représentées de la même manière.

Le transport arrive en tête. Ensuite les bâtiments, l'agriculture et l'industrie à peu près à parité. Et enfin le secteur énergétique qui est petit, parce qu'encore une fois la production électrique au charbon on en a très peu en France, et c'est ça qui fait l'essentiel de la différence.

42. Dis-moi ce que tu émets, je te dirai si tu consommes



Diapositive 43.

Il y a une autre manière de présenter les émissions de gaz à effet de serre, qui sont les émissions qui sont issues de notre empreinte carbone.

Notre empreinte carbone c'est quoi ?

C'est – par opposition aux émissions qui sont dites « territoriales » (c'est-à-dire les émissions qui viennent de la France) – les émissions qui sont la contrepartie de ce qu'on consomme. Quand on regarde les émissions présentées comme ça : ce sont les émissions qui prennent place sur le sol français.

Or les vêtements que vous portez par exemple, il y en a beaucoup qui ont été fabriqués ailleurs. Par exemple si vous portez des fibres synthétiques : une partie de ces fibres synthétiques vient d'ailleurs. Il a fallu extraire du pétrole, craquer les molécules de pétrole, faire du plastique, puis transformer et polymériser les monomères, etc. Enfin tout un tas de choses dont une bonne partie n'a pas été faite en France. Donc pour toutes les fibres « poly-quelque-chose », les émissions n'ont pas été faites en France.

Si vous achetez aujourd'hui un ordinateur, cet ordinateur n'a pas été fait en France. Donc les émissions de production de cet ordinateur sont essentiellement des émissions extra-territoriales.

Si vous achetez des tomates espagnoles en cette saison, ce qui est très mal parce que ça pompe les nappes phréatiques, vous avez acheté des tomates qui ont engendré des émissions. Par exemple pour actionner les pompes, enrichir les serres en CO_2 – parce que il se trouve qu'il y a des serres qui sont enrichies en CO_2 pour que les tomates poussent plus vite, pour quoi on brûle du gaz. Tout ça n'a pas nécessairement pris place en France, etc.

Et puis si vous achetez une voiture qu'un constructeur, même français, a fabriquée en Roumanie ou au Maroc, les émissions correspondantes n'ont pas non plus eu lieu en France.

Donc dans la vision des émissions territoriales, vous ne regardez que ce qui est fait en France. Mais ça ne correspond pas nécessairement à ce que vous, vous allez acheter ou consommer. Ça ne correspond pas nécessairement à ça. Ça correspond à ce qui s'est passé chez nous. Et corrélativement, une partie des émissions qui se passent chez nous sont au service de quelque chose qui va être consommé à l'extérieur.

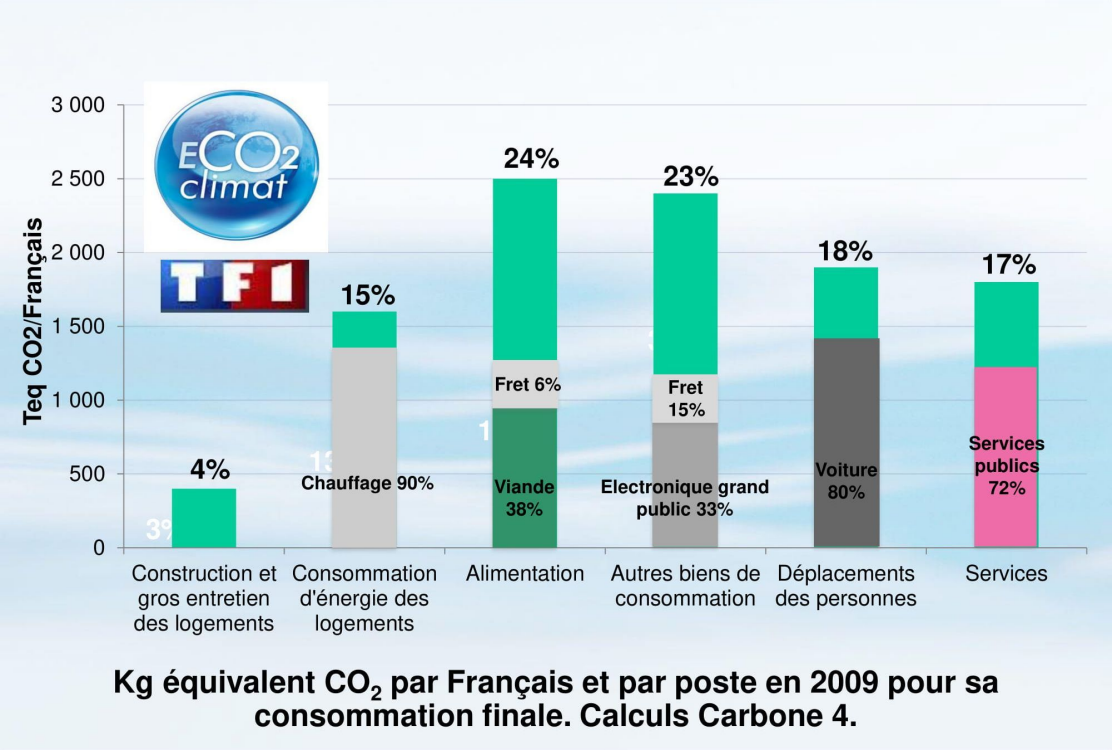
Par exemple, quand vous fabriquez un Airbus chez nous, les émissions de fabrication de l'Airbus sont normalement dans une vision consommation : elles sont à imputer à la compagnie aérienne qui va vous acheter l'Airbus. Qui n'est pas nécessairement une compagnie française (et même, essentiellement pas une compagnie française).

Quand vous faites du vin – ce qui n'est pas très, très riche en CO_2, mais un peu quand même (il faut faire la bouteille, la balader en camion, faire passer des tracteurs, ...) – cette bouteille de vin, si elle est exportée, ces émissions ont lieu en France mais ce n'est pas vous qui allez vous régaler en buvant la bouteille.

Donc les émissions territoriales, ce sont les émissions de ce qui se passe en France.

Dans une vision consommation, on utilise l'empreinte carbone. Que vous voyez ici et qui correspond aux émissions qui ont pris place pour que vous puissiez bénéficier du produit ou du service que vous allez utiliser.

Les émissions domestiques d'un Français, si on reprend la courbe vue tout à l'heure et qu'on divise par la population, on tombe sur le chiffre de un peu moins de 6 tonnes de CO_2 par français et par an. Juste pour le CO_2. Si on rajoute les gaz hors CO_2, on tombe plutôt sur 8.



Diapositive 43.

Ces 6 tonnes correspondent aux émissions domestiques.

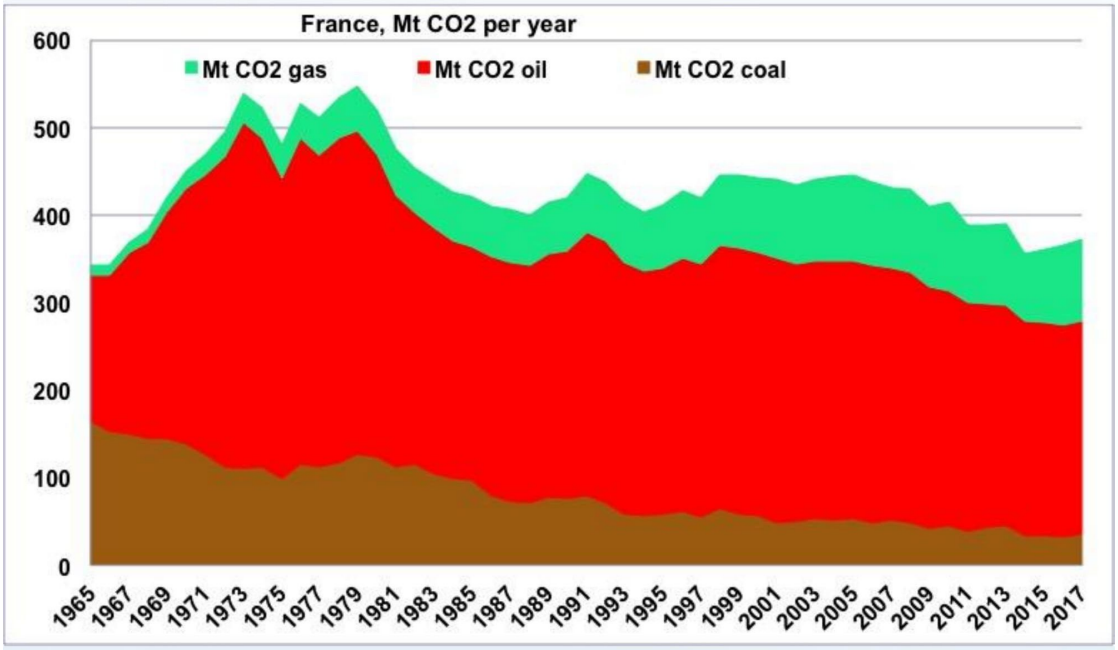
Là, sur la vision de l'empreinte carbone par français, on voit que le total fait plutôt environ 10, 11 tonnes. Donc on est au-dessus des 8 tonnes évoquées tout à l'heure.

La différence, ce sont les émissions qui ont pris place à l'extérieur du pays et qui correspondent aux biens de consommation qu'on a importés pour pouvoir les consommer chez nous.

Donc la question de la vertu climatique de la France se pose : est-ce qu'elle s'apprécie au regard de nos émissions territoriales – donc on dit « chez nous on n'émet pas beaucoup » – ou est-ce qu'elle s'apprécie au regard des émissions de la consommation – et à ce moment on devrait pouvoir dire « ce qu'on consomme chez nous, ça n'émet pas beaucoup » ? Et le résultat est un peu différent.

∗ ∗ ∗ Question auditoire ∗ ∗ ∗

Les émissions domestiques de la Chine sont devenues, sur le CO_2, un peu supérieures à celle de la France. Par contre, comme vous le savez si vous lisez les démêlés récents des chinois avec M. Trump, une partie des émissions do-



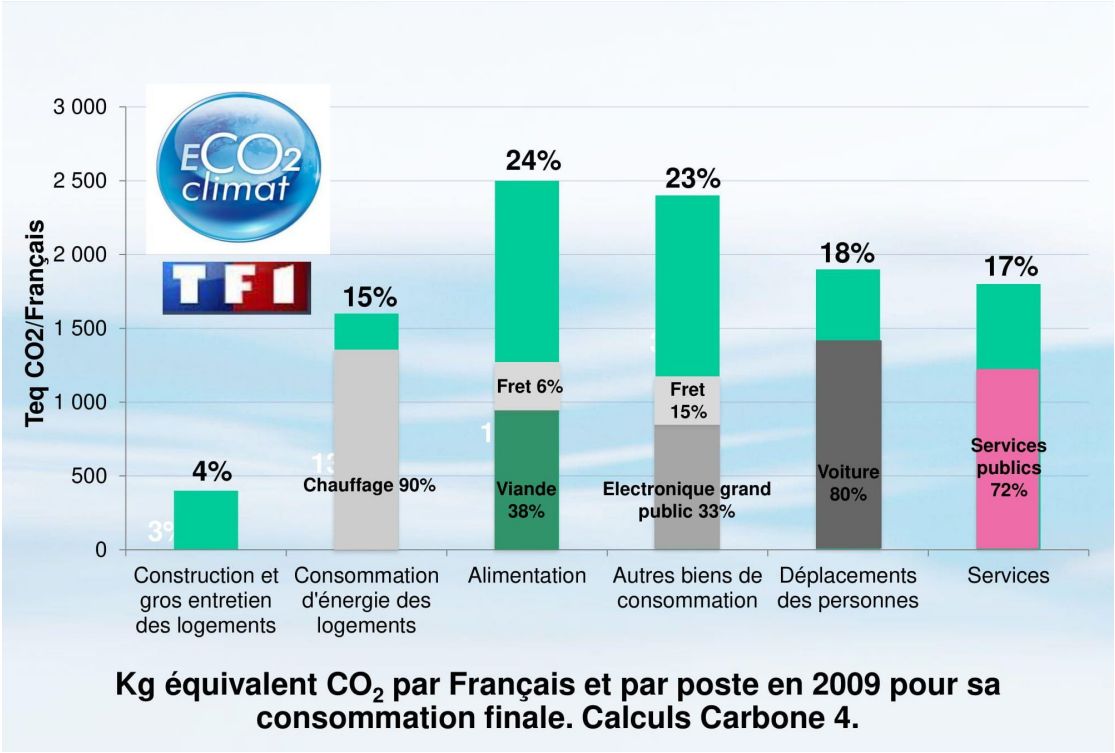
Emissions de CO_2 en France depuis 1965, en millions de tonnes. Calculs de l'auteur sur données BP Statistical Review 2018

Diapositive 23.

mestiques de la Chine sert à l'exportation. Donc en vision consommation, les chinois sont en-dessous de nous. En vision territoriale, ils sont maintenant légèrement au-dessus des Français, en-dessous des Européens encore, mais pas beaucoup.

Dans cette vision territoriale [*sic* : consommation], vous prenez les émissions domestiques, vous enlevez ce qui sert l'exportation, vous rajoutez ce qui sert l'importation, en gros.

Donc on passe de 6-8 tonnes de CO_2 par personne à 10 tonnes, et on voit sur la décomposition de ce graphique finalement à quels actes de la vie courante sont associées les émissions que nous avons aujourd'hui. Et finalement ça pose la question suivante : « Le citoyen-consommateur-électeur, où va-t-il devoir faire des efforts (seul ou en association avec les gens qui lui ont fourni les produits ou services) pour que les émissions baissent ? » C'est ça la question.



Diapositive 43.

La construction

Pour les émissions en France, une première partie vient du fait qu'on construit des logements. Vous savez que chaque année, on construit des logements : on en construit quelques centaines de milliers. Évidemment, chaque personne ne se fait pas construire un logement chaque année. Ça marche peut être pour quelques émirs du pétrole mais pas pour le Français ordinaire.

Par contre, chaque année en France, vous avez quelques centaines de milliers de logements qui sont construits. Et, rapporté aux Français, ça représente en gros, quelques centaines de kilos de CO_2 par Français et par an. C'est-à-dire la construction, en gros, de 1 à 1,5 mètres carrés par Français et par an. Les émissions de construction d'un logement, ce sont quelques centaines de kilos de CO_2 par mètre carré selon ce que vous faites en logement individuel, en logements collectifs, etc. Disons que ça oscille entre 200 et 400 kilos de CO_2.

Donc quand on fait construire une maison ou un appartement de 100 mètres carrés, c'est d'un seul coup 20 à 40 tonnes de CO_2 qui partent dans l'atmosphère. Ces 20 à 40 tonnes de CO_2 viennent d'où ?

— De l'acier qu'il faut fabriquer pour faire les fers à béton.

— Du ciment qu'il faut fabriquer pour faire le béton.

— Du plastique qui va servir dans tout le bâtiment – les encadrements de fenêtres, les bâches que vous mettez par terre, l'étanchéité de la maison ou de l'appartement (enfin vous avez du plastique partout dans le bâtiment).

— Des tuiles.

— Des briques.

— Etc.

Donc par Français et par année, 1,5 mètre carré en ordre de grandeur.

Le confort thermique

Après vous avez un deuxième élément qui est le confort thermique et le confort énergétique du logement. *Confer* ce que je vous ai dit au premier cours, bien qu'on dise que la France soit un pays tout nucléaire, nous utilisons quatre fois plus d'énergie sous forme fossile dans le chauffage des bâtiments que d'énergie électrique.

Quatre fois plus.

Donc une bonne partie des émissions de gaz à effet de serre – là en l'occurrence c'est essentiellement du CO_2 – qu'on trouve dans les logements vient du chauffage. Qui est fait en utilisant du gaz et du fioul.

Ça c'est la partie hors chauffage qui pour le coup, est purement électrique.

En France, nous avons un facteur d'émissions de l'électricité qui est très bas, même en tenant compte des importations – parce que de temps en temps on importe un peu d'électricité. Si nous étions en Pologne, ce petit morceau-là, quelle taille ferait-il ? Par rapport à celui-là. Ça doublerait ? Ça quadruplerait ? Ça sextuplerait ? Ça décuplerait ? Alors en gros, ça octuplerait. Ça serait multiplié par 8 à 10. Donc cette barre-là serait supérieure à cette barre-là.

Ça c'est une des caractéristiques de la France qui, comme vous le savez, a une électricité qui est peu carbonée. Si vous allez en Suisse, en Suède, en Norvège, vous allez retrouver une proportion – ou plus exactement une importance de la consommation d'électricité dans les logements dans l'empreinte carbone globale – qui va être aussi raisonnablement faible.

Par contre, il y a des pays dans lesquels l'électricité est carbonée. Et a fortiori des pays dans lesquels, en plus du chauffage, il y a de la climatisation. Typiquement : dans un climat continental au milieu des États-Unis, on meurt de froid l'hiver, on meurt de chaud l'été, et en plus leurs maisons sont mal isolées. Là vous allez avoir à la fois des émissions de chauffage importantes et des émissions d'utilisation de l'électricité très importantes.

L'alimentation et les biens de consommation

Après on trouve la barre ici, qui s'appelle « miam miam ».

On constate sur ce graphique qu'il y a d'autres analyses qui donnent ça un peu en-dessous des biens de consommation. Mais ce sont les deux premiers postes qui ressortent : en gros, ce qui va arriver en premier dans l'empreinte carbone d'un Français, ce sont les émissions de gaz à effet de serre qui sont la contrepartie de ce qu'on achète à la fois en biens courants et en biens durables. Cela inclut aussi les machines à laver, les voitures, etc.

Et la nourriture.

Donc l'alimentation et les achats, ce sont, en gros, la moitié de l'empreinte carbone d'un Français.

Donc à chaque fois que vous allez faire les soldes, le compteur à CO_2 se met en route. À chaque fois que vous allez acheter des habits, un canapé, dès que vous rentrez dans un supermarché et que vous en ressortez avec autre chose que ce qui se mange – une brosse à dents, une balayette à toilettes, ce que vous voulez – le compteur à CO_2 s'est mis en route. Parce qu'il a fallu fabriquer un de ces 100 000 produits – puisque c'est à peu près ça qu'on a maintenant dans les supermarchés – et comme je vous l'ai expliqué au premier cours, la chaîne s'est mise en route depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la dernière livraison dans le supermarché pour que ce produit ou ce service existe.

Alors dans l'alimentation et dans les achats, j'ai mis le premier constituant dans chacun des cas de figure.

Le fret n'a pas été affecté aux produits parce qu'à l'époque où on a fait cette analyse à Carbone 4, on n'était pas capable d'imputer le fret par catégories de marchandises. On aurait pu faire une estimation qui serait une répartition au prorata des valeurs. Sauf qu'en réalité, le fret c'est au prorata des tonnages, et les tonnages ce ne sont pas nécessairement les valeurs. Un camion qui transporte des ordinateurs, ce n'est pas la même valeur qu'un camion qui transporte des salades, pour le contenu de la cargaison. Donc on a eu du mal et on n'a pas imputé.

Par contre vous voyez ici que la première barre de l'alimentation, c'est la viande et en particulier la viande rouge. Et si je rajoute les produits lactés qui sont un autre dérivé du cheptel bovin, la part des émissions qui vient en France de l'existence d'un cheptel bovin, c'est entre la moitié et les deux tiers de notre empreinte carbone.

∗ ∗ ∗ Question auditoire ∗ ∗ ∗

Évidemment. C'est une analyse en cycle de vie. Donc ce qu'on va compter dans les émissions de la viande ce sont les émissions agricoles qui ont servi à faire pousser les végétaux qui vont permettre de nourrir l'animal. Donc le diesel du tracteur, la fabrication des engrais azotés qui vont être utilisés sur les cultures végétales, etc. Et cette fabrication est faite en craquant du gaz. Les engrais azotés, c'est la chimie de l'ammoniac. Et la chimie de l'ammoniac, ça commence par produire de l'hydrogène en craquant du méthane. Ça fait autant de CO_2 qu'on veut.

Il y a également les émissions de N_2O en provenance des champs, puisqu'il a fallu que ces émissions aient lieu pour avoir les végétaux. Puis on a les émissions du métabolisme de la vache. Tout ça mis bout-à-bout fait l'empreinte carbone de la viande dans la barre qui est là. C'est pareil pour les fromages. Mais c'est une affaire d'imputation. C'est-à-dire que le cheptel bovin produit de la viande, du lait et du fromage – donc du lait transformé – et la question est de savoir comment on alloue ça.

On peut en discuter pendant des heures : est-ce qu'on alloue ça économiquement ? Massiquement ? En sachant qu'une vache laitière fait 10 tonnes de lait par an pendant quelques années et à la fin, il reste 500 kilos de carcasse :

— Est-ce-que la viande est un déchet ? Dans ce cas ça vaut zéro.

— Est-ce-que la viande, vous la payez cher ? Donc ça ne vaut pas du tout zéro ?

Donc il y a tout un tas de manières de faire mais c'est ça le principe dans le diagramme que je vous montre : on compte tout ce qui a été nécessaire du début jusqu'à la fin.

∗ ∗ ∗ Question auditoire ∗ ∗ ∗

Attention. Ne confondez pas deux choses : là ce qu'on compte, ce n'est pas des émissions de CO_2 du carbone contenu dans les végétaux. Ce sont les émissions de gaz à effet de serre hors carbone contenu dans les végétaux qui sont nécessaires pour que les végétaux poussent. Donc, pour que les végétaux poussent, vous avez le tracteur qui passe et qui brûle du diesel, enfin du fioul. Ce n'est pas le carbone des végétaux.

Vous épandez des engrais dans les champs, c'est du N_2O, ce n'est pas le carbone des végétaux. Et on ne va pas le compter une deuxième fois parce que la vache, quand elle rumine, ce n'est pas équivalent à passer un tracteur dans le champ. Et ce n'est pas non plus équivalent à épandre des engrais par terre. Donc c'est toute la chaîne.

Et il y avait une question au fond.

∗ ∗ ∗ Question auditoire ∗ ∗ ∗

Oui, c'est ce que je disais tout à l'heure, C'est une affaire d'allocations. En gros, pour faire un kilo de fromage type comté, il faut 10 litres de lait. Donc le contenu carbone par kilo du comté est en gros dix fois supérieur au contenu carbone par kilo du lait. Et ce que je vous ai montré, c'était rapporté à l'unité de masse. J'aurais pu prendre une autre échelle. J'aurais pu rapporter à la calorie. J'aurais pu rapporter à l'euro. Il y a toujours une convention dans cette histoire. Là, je vous ai proposé par kilo.

La calorie est probablement plus pertinente si on veut vraiment commencer à faire des comparaisons entre aliments.

Le fait qu'on ait tant pour le lait et tant pour la viande, je le redis : c'est une convention. Si on regarde les races laitières, on les utilise essentiellement pour produire du lait. Donc on peut dire qu'en gros, la carcasse de la vache en fin de vie, c'est un déchet. D'ailleurs, on ferait du lait même si personne n'achetait la carcasse. Donc dans une analyse de cycle de vie, quand on a un déchet, on valorise ça à zéro.

Si on dit que ça a quand même un peu de valeur, on peut compter ça au prorata de la masse. Mais comme on a 30 tonnes de lait qui ont été produites par la vache sur sa durée de vie versus 500 kilos de carcasse à l'arrivée, ça ne fait pas beaucoup d'émissions qui sont affectées à la viande.

Si on agrège ensemble les vaches laitières en fin de vie et les races à viande qui ne sont faites que pour la viande, on a alors une valeur moyenne pour le contenu carbone par kilo de viande qui est beaucoup plus élevée. Donc ça dépend vraiment de la manière dont le calcul est fait.

Par contre, ce qui est intéressant, c'est qu'on n'a pas discriminé. C'est-à-dire qu'on prend les émissions de l'ensemble du cheptel bovin et on dit que ça va dans la viande.

∗ ∗ ∗ Question auditoire ∗ ∗ ∗

Alors on a un chapitre sur le nucléaire donc je vous en parlerai à ce moment-là. Là, je suis juste en train d'essayer de vous faire réfléchir sur « les émissions et moi ». Dit autrement, là-dedans ce qui est arbitrable par le consommateur – sans en discuter longuement aujourd'hui mais ça prépare cette réflexion – c'est-à-dire ce qui relève de mon libre-arbitre et ce que je décide de faire ou pas. Ce qui est un peu plus compliqué parce que ça relève de la manière dont la société s'est organisée dans un contexte dans lequel on m'a modérément demandé mon avis.

Donc ce qu'on voit pour finir, c'est que l'alimentation c'est le premier poste. C'est important d'insister là-dessus parce que pendant très, très longtemps et encore aujourd'hui, on présente souvent la question de la lutte contre le changement climatique comme un problème :

— d'abord *hors-climat* – c'est à dire d'éoliennes et de panneaux solaires ;

— et quand on rentre dans le climat : de transports. On va beaucoup se focaliser sur les transports.

Alors que je vous montre que les deux premiers postes, vu du consommateur final, ne sont pas là.

Donc vous avez ici ce que vous achetez (les biens de consommations). Petit quizz : quelle était la hauteur de cette barre (celle des biens de consommation) en 1990 ? Eh bien en 1990 la barre faisait la hauteur de ça + ça (la même barre avec la partie vert et le fret mais sans les 17 % de fabrication de l'électronique grand public).

Autrement dit, il s'est passé entre 1990 et 2010 que les émissions – qui sont la contrepartie de ce qu'on achetait avant l'électronique : les chemises, les tables, les canapés, les lunettes, etc. – sont restées à peu près les mêmes, et on a rajouté à ça les émissions de fabrication de l'électronique (les +17 %).

La fabrication et l'usage du système numérique mondial

Concernant les émissions de fabrication de l'électronique, retenez qu'aujourd'hui les émissions du système numérique mondial – c'est-à-dire la production annuelle des ordinateurs de toute nature, que ce soit les serveurs, les ordinateurs que je suis en train d'utiliser, vos smartphones qui sont en fait des ordinateurs déjà beaucoup plus puissants que le premier ordinateur dont j'ai parlé tout à l'heure (qui a été fait dans les années 50, l'ENIAC), les éléments de réseaux qui sont nécessaires pour que ça communique, les data centers et l'électricité qui est nécessaire tous les ans pour alimenter tout ça (donc à la fois la production annuelle de tous ces composants et l'électricité qui alimente tout ça tous les ans) – chaque année, *c'est déjà 4 % des émissions planétaires*.

Cela représente déjà la même chose que la flotte mondiale de camions, et ça augmente quasiment de 10 % tous les ans. Donc si vous voulez un truc non-durable, le numérique aujourd'hui, c'est ce qu'on fait de plus emblématique dans le non-durable. *L'idée qu'on a dématérialisé en mettant du numérique partout, malheureusement, c'est l'exact inverse de ce qu'on est en train de faire*.

Donc ce compartiment-là n'existait pas il y a 20 ans. Et croyez-le ou pas, je suis né dans un monde dans lequel il n'y avait pas de smartphones. Ce monde a existé. Il n'y avait pas d'ordinateur portable. Il n'y avait même pas de téléphone portable. Ça n'existait pas.

Les déplacements individuels

Ici vous avez la contrepartie des déplacements individuels, à l'exception des déplacements professionnels qui ne sont pas pris en compte. Par exemple si vous avez un conférencier qui vient des États-Unis pour vous faire une conférence dans cette école en avion (parce que c'est peu probable qu'il le fasse en kayak de mer), ça ne sera pas dans l'empreinte carbone de l'Américain en question parce que c'est un déplacement professionnel.

Donc là, il n'y a que les déplacements personnels. On voit que l'essentiel c'est la voiture. Mais là, on a un gros paquet qui est essentiellement l'avion. Et l'avion, c'est pareil : en 1990, ce bloc n'existait à peu près pas.

Quand j'avais votre âge, je suis parti en stage aux États-Unis. Nous étions donc en 1986. Et en 1986 partir en avion aux États-Unis, c'était passer la nuit à Orly pour prendre un charter dont vous ne saviez pas à quelle heure il allait vraiment partir, et puis c'était l'aventure de votre vie ! Vous arriviez là-bas 10 heures en avance, etc. Vous faisiez ça une fois et vous aviez l'impression d'avoir fait un exploit. Et c'était à l'époque, encore plus qu'aujourd'hui, réservé aux CSP++, etc.

Donc l'avion a explosé sur les 15 dernières années. Et ces émissions-là ne sont pas dans les inventaires nationaux, parce que quand un avion d'Air France quitte un aéroport allemand pour aller aux États-Unis avec un passager indien, personne ne veut des émissions.

— Les Français disent : « Non, ça a transporté un passager qui n'est pas de chez moi pour aller de l'Allemagne aux États-Unis, donc ça ne peut pas être à moi. Même si c'est Air France, ça ne peut pas être à moi. »

— L'Allemagne va dire : « Ça ne peut pas être à moi puisqu'il allait aux États-Unis. »

— Les États-Unis disent : « Ça ne peut pas être à moi puisqu'il transportait l'Indien. »

— Et l'Indien dit : « Ça ne peut pas être à moi puisque je prenais un avion français. »

Donc résultat des courses ces choses-là ne sont à personne : ça n'est dans aucun inventaire national et ça se retrouve dans un stock qui s'appelle les « soutes ». Quand on voit dans les diagrammes d'émissions, une ligne qui s'appelle « soutes », ce sont en fait les émissions dont personne ne veut parce que ça a pris place dans l'espace international.

— Alors si c'est « soutes aériennes », c'est un avion français transportant un Indien d'Allemagne en Grande-Bretagne.

— Et si c'est « soutes maritimes », c'est pareil : c'est un cargo ou un porte-conteneurs de Mersk (compagnie danoise), qui est parti d'Anvers pour rallier Shanghaï en transportant des biens faits en Corée.

C'est pareil, tout le monde dit : « Les émissions ne sont pas à moi. »

* * * Question auditoire * * *

Ce n'est pas cher ! C'est ce que j'ai expliqué la dernière fois : rapporté en minutes de temps de travail, le prix du billet d'avion a été divisé par 10. Donc pourquoi vous embêter la vie quand Easy-Jet vous offre un vol pour Bratislava pour 40 euros ? Vous le faites.

∗ ∗ ∗ Question auditoire ∗ ∗ ∗

Le train est imperceptible. Le train en France, c'est en gros 2 % en ordre de grandeur de l'énergie utilisée par les transports aériens et routiers et en plus c'est décarboné. Donc ce n'est pas visible là, c'est l'épaisseur du trait. C'est même moins de l'épaisseur du trait.

Les chiffres en France pour le transport aérien domestique – parce qu'il faut comparer des choses comparables – ce sont quelques millions de passagers par an. Paris-Toulouse c'est, disons 2,5. Donc disons 5 millions de passagers sur 1000 km en ordre de grandeur, donc cinq millions multipliés par mille ça vous fait cinq milliards de passagers-kilomètres. Le train, c'est beaucoup plus important, c'est de l'ordre de 70 milliards de passagers-kilomètres.

Donc on voit que la barre, en 1990, elle était haute comme ça (juste la barre grise correspondant au transport en voiture), et ça, ça s'est rajouté (la barre verte correspondant aux déplacements en avion).

Les services publics

Et enfin ici on a les services publics. Alors pourquoi vous avez des émissions dans les services publics ?

Très mauvaise nouvelle pour vous : à chaque fois que vous rentrez dans cet amphithéâtre, vous émettez des gaz à effet de serre. Parce qu'il faut le chauffer l'hiver. Parce qu'il a fallu construire cette école – il y a longtemps cela étant, maintenant il y a prescription. Parce qu'il faut que je vienne ici de même que tous les autres profs comme moi, etc.

Donc l'Éducation Nationale occasionne des émissions. L'Éducation Nationale emploie de l'ordre d'un million de personnes. Elle chauffe énormément de bâtiments. Il y a énormément de bâtiments d'éducation : des lycées, des écoles, etc., qui sont chauffés. Donc ce sont des émissions.

Deuxième gros poste d'émissions : la santé. La santé occasionne probablement de l'ordre de 5 % de l'empreinte carbone du pays parce qu'il faut chauffer les hôpitaux, fabriquer les médicaments, les scanners, les consommables, les appareils qui servent à savoir si vous avez attrapé une maladie honteuse ou pas, etc. Donc toutes ces choses vont concourir à l'empreinte carbone de l'hôpital.

Et enfin, le dernier grand poste dans les services publics (auquel vous n'allez sûrement pas penser), c'est ? Ah, c'est bien.

L'armée.

Donc pour ceux d'entre vous qui ont vu « Top Gun », vous vous rappelez que l'armée possède des gros objets qui consomment beaucoup, beaucoup de kérosène ou de carburant. La consommation de pétrole de l'armée américaine, c'est entre le tiers et la moitié de la consommation de pétrole de la France.

En France nous avons une plus petite armée. Ça représente tout de même quelques points, et donc ça vous appartient à vous tous, dans votre empreinte carbone. Puisque vous êtes tous bénéficiaires du fait qu'on ait un système de soins, un système d'enseignement, ou une armée.

Donc c'était la partie « changement climatique » sur ce qu'est le climat, ce que sont les émissions, etc.

La prochaine fois, on verra ce que ça fait au système climatique et quelles en sont les conséquences…

Fin.

The Shifters: association de bénévoles en soutien au Shift Project

The Shifters est un réseau de bénévoles aux profils, expériences et compétences très variés (mais qui se rejoignent par leur intérêt) pour la transition carbone de l'économie, qu'ils soient déjà actifs dans ce domaine ou non.

Les Shifters se consacrent à trois missions:

- *Appuyer* The Shift Project dans ses travaux, en mettant ponctuellement à disposition de l'équipe du Shift leur force de travail et/ou leurs compétences.
- *S'informer*, débattre et se former sur la décarbonation de l'économie (sous ses aspects aussi bien scientifiques que techniques et politiques, au sens large, et en termes d'enjeux, d'acteurs, de solutions et d'actualité).
- *Diffuser* les idées et travaux du Shift dans leurs propres réseaux et développer de nouveaux réseaux dans la décarbonation de l'économie. Ils s'appuient pour ce faire sur les cinq valeurs fondamentales que sont l'exigence scientifique et technique, l'ouverture, l'impartialité, le professionnalisme et la convivialité.

Rejoindre les Shifters

Que vous soyez traducteur, professeur, en recherche d'emploi, père au foyer, artiste, ingénieur ou écrivain, médecin ou jardinier, antiquaire ou maraîchère, tous les talents sont les bienvenus pour relever ensemble les défis du changement climatique et de la transition énergétique!

- *Si vous voulez nous rejoindre*, rendez-vous sur l'onglet *Nos bénévoles « Shifters »* à l'URL suivante: `https://theshiftproject.org/equipe/`
- *Pour toute autre question*, vous pouvez envoyer un mail à: `contact-shifters@theshiftproject.org`.