

Éléments de base sur l'énergie au XXI^e siècle
Partie 4 – Le changement climatique (2)



Cours magistraux dispensés à MINES ParisTech
Année scolaire 2018 – 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=JKoRsO5fkAQ>

Ce document est placé sous licence 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

| | |
|--|----|
| Introduction | 1 |
| 1 Chaud seulement, ou froid aussi? | 2 |
| 2 Les gaz chauffent; les aérosols refroidissent... Quel bilan? | 4 |
| 3 Simuler le climat, pas plus fiable qu'un pronostic boursier? | 6 |
| 4 Et après? | 9 |
| 5 J'émet, l'atmosphère concentre | 11 |
| 6 Qu'est-ce qu'un modèle climatique? | 13 |
| 7 Amélioration en complexité, mais aussi en résolution | 15 |
| 8 Les modèles font aussi l'objet d'améliorations continues! | 17 |
| 9 Des modèles testés avant d'être « vendus » | 19 |
| 10 J'y mets mes scénarios d'émission dans les modèles : quid? | 22 |
| 11 Existe-t-il réellement un haut de fourchette? | 25 |
| 12 Quelques degrés en un siècle, pas une affaire courante... | 27 |
| 13 Quelques degrés en un million d'années, déjà plus | 31 |
| 14 5 °C de plus en un siècle, juste un pull en moins? | 33 |
| 15 Le problème est devant, pas derrière! | 36 |
| 16 Et pour quelques degrés de plus... | 39 |
| 17 Il paraît que le réchauffement s'est arrêté? | 41 |
| 18 Quelles seront les impacts du changement climatique? | 43 |
| 19 Chauffe (un peu) Marcel | 45 |
| 20 Chauffe (un peu plus) Marcel | 47 |
| 21 Notre affaire a déjà commencé? | 51 |
| 22 Attention aux manipulations statistiques... | 53 |
| 23 Notre affaire a déjà commencé? | 55 |
| 24 Notre affaire a déjà commencé? | 56 |
| 25 Notre affaire a déjà commencé? | 58 |
| 26 Un changement déjà décelable? | 60 |
| 27 Un simple déplacement de moyenne sera déjà un problème | 62 |
| 28 Et en plus la variabilité peut s'en mêler! | 63 |
| 29 Du global au local : une autre paire de manches | 64 |
| 30 Et de fait la variabilité devrait s'en mêler... | 66 |
| 31 L'été 2003 deviendra-t-il la norme? | 67 |

| | | |
|----|--|-----|
| 32 | Chaud aux pieds mais froid à la tête | 68 |
| 33 | Un climat, ce n'est pas juste une température moyenne | 69 |
| 34 | Un climat, ce n'est pas juste une température moyenne (2) | 72 |
| 35 | Un climat, ce n'est pas juste une température moyenne (3) | 74 |
| 36 | Déjà plus d'épisodes pluvieux intenses? | 76 |
| 37 | Déjà des sols plus secs? | 77 |
| 38 | Plus « d'épisodes cévenols » en France? Pas clair | 78 |
| 39 | Atteinte des écosystèmes continentaux et de l'agriculture | 80 |
| 40 | Exemple : le hêtre en France | 82 |
| 41 | Exemple (2) : le sapin en France | 84 |
| 42 | Ça brûle! (aujourd'hui) | 85 |
| 43 | Ça brûle! (aujourd'hui) | 86 |
| 44 | J'y mets mes scénarios d'émission dans les modèles : quid? | 87 |
| 45 | Ça brûle! (aujourd'hui) | 88 |
| 46 | Survivra, survivra pas? | 89 |
| 47 | Poussera, poussera pas? | 91 |
| 48 | Mangera, mangera pas? | 92 |
| 49 | Impact sur la santé : fichue biodiversité! | 95 |
| 50 | Impact sur la santé : exemples | 96 |
| 51 | Élévation du niveau des océans : Archimède or not? | 98 |
| 52 | Not Archimède : la banquise fond | 101 |
| 53 | Not Archimède again : la banquise mincit aussi | 102 |
| 54 | Mais beaucoup d'Archimède se profilent peut-être à l'horizon | 104 |
| 55 | Help! | 106 |
| 56 | Gérer un port en 2478, ça risque d'être compliqué | 107 |
| 57 | Gérer un port en 2478, ça risque d'être compliqué | 108 |
| 58 | Le jour d'Après est-il pour demain? | 111 |
| 59 | Petit coup de frein ou gros cash, là est la question | 113 |
| 60 | Déjà plus de cyclones? P'têt ben qu'oui, p'têt ben qu'non... | 115 |
| 61 | Une puissance cyclonique accrue? P'têt ben qu'oui... | 116 |
| 62 | Tourne (et monte) Marcel | 117 |
| 63 | Plus d'El Niño? À voir... | 118 |
| 64 | Il n'est pas toujours souhaitable d'être acide | 119 |
| 65 | Le pH de l'océan, bien plus stable que tout régime politique! | 120 |
| 66 | Moins de calcaire produit = pas de pot pour les coraux | 121 |
| 67 | S'adaptera, s'adaptera pas? | 122 |
| 68 | Plus de CO ₂ = plus chaud, mais l'inverse est vrai aussi! | 124 |
| 69 | Au secours! Où est le bouton « reset »? | 127 |
| 70 | Quelques éléments de conclusion | 129 |

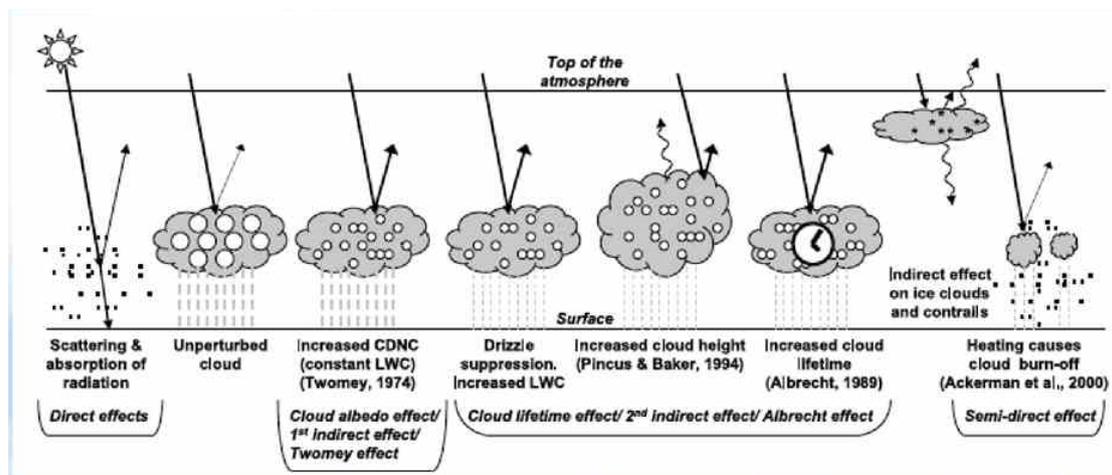
Introduction

On aurait pu intituler cette session Apocalypse Now. Donc je vais vous parler des conséquences du changement climatique. Enfin pas « now » tout de suite quand même, il y a une partie qui va attendre un peu.

Donc la dernière fois, je vous ai parlé de la dynamique à l'œuvre dans ce qu'on a coutume d'appeler le changement climatique.

Alors il y a une chose... Je n'ai pas tout à fait terminé le tour d'horizon la dernière fois. Parce que dans les substances que l'Homme met dans l'atmosphère, il y a certes les gaz à effet de serre dont je vous ai longuement parlé, mais il y a également une autre catégorie de substances (que les Hommes mettent dans l'atmosphère), qui s'appelle des aérosols et des précurseurs d'aérosols.

1. Chaud seulement, ou froid aussi ?



Diapositive 2.

Alors un aérosol, en langage physique, est tout simplement une suspension dans l'air de particules liquides ou solides.

Donc tous les gens dans cette salle qui ont déjà passé un balai, s'il y en a quelques-uns à qui c'est arrivé, vous avez créé un aérosol à cette occasion, puisque vous avez créé une suspension dans l'air de particules solides (si vous avez balayé un peu énergiquement).

Alors dans les éléments que l'Homme met dans l'atmosphère et qui peuvent créer des suspensions dans l'air, vous avez en fait à la fois des éléments qui sont émis directement sous forme de liquides ou de solides, et qui vont ensuite créer des suspensions... Par exemple la suie : la suie est une suspension dans l'air de particules de carbone. Donc ça fait partie des aérosols. Et puis vous avez des substances qui vont créer les aérosols une fois dans l'air, c'est-à-dire que c'est émis sous forme gazeuse et c'est une fois dans l'air qu'il se passe une réaction qui va transformer les substances chimiques en particules liquides ou solides.

Et alors, là-dedans, vous avez une catégorie très importante, qui est le dioxyde de soufre (SO₂), qui une fois dans l'atmosphère va créer des particules de sulfate, qui sont des particules brillantes et particulièrement réfléchissantes pour la lumière solaire. Et donc il y a cette particularité, par exemple, que les carburants particulièrement soufrés (qui sont utilisés par la marine marchande) ont à court terme un effet refroidissant qui est plus important que l'effet réchauffant. Je dis bien à court terme parce que les aérosols finissent par être

1. CHAUD SEULEMENT, OU FROID AUSSI?

épurés de l'atmosphère notamment par les précipitations. Par exemple pour les aérosols soufrés, ça finit par donner des pluies acides. Le sulfate se dissout dans l'eau quand il y a de l'eau, et ça fait un peu d'acide sulfurique qu'on aime beaucoup une fois que ça arrive par terre.

Vous avez également un autre effet qui est important dans les effets des aérosols, c'est que ces petites particules liquides ou solides peuvent servir de noyaux de nucléation et favoriser la condensation de la vapeur d'eau pour former des nuages. Et on s'est rendu compte, notamment, que au-dessus des zones qui étaient très industrialisées, les nuages qui se formaient étaient formés de particules qui étaient un peu plus fines et qui précipitaient un peu moins facilement. Donc ça a un effet, pas nécessairement sur la couverture nuageuse, mais par contre sur la tenue de cette couverture nuageuse, ça a un effet.

Donc les émissions humaines peuvent également un peu modifier la nature des nuages que nous allons trouver au-dessus de nos têtes. Quand les particules émises – je reviens à la suie – sont noires, évidemment, ça intensifie le réchauffement parce que ça augmente la quantité de rayonnement solaire absorbée.

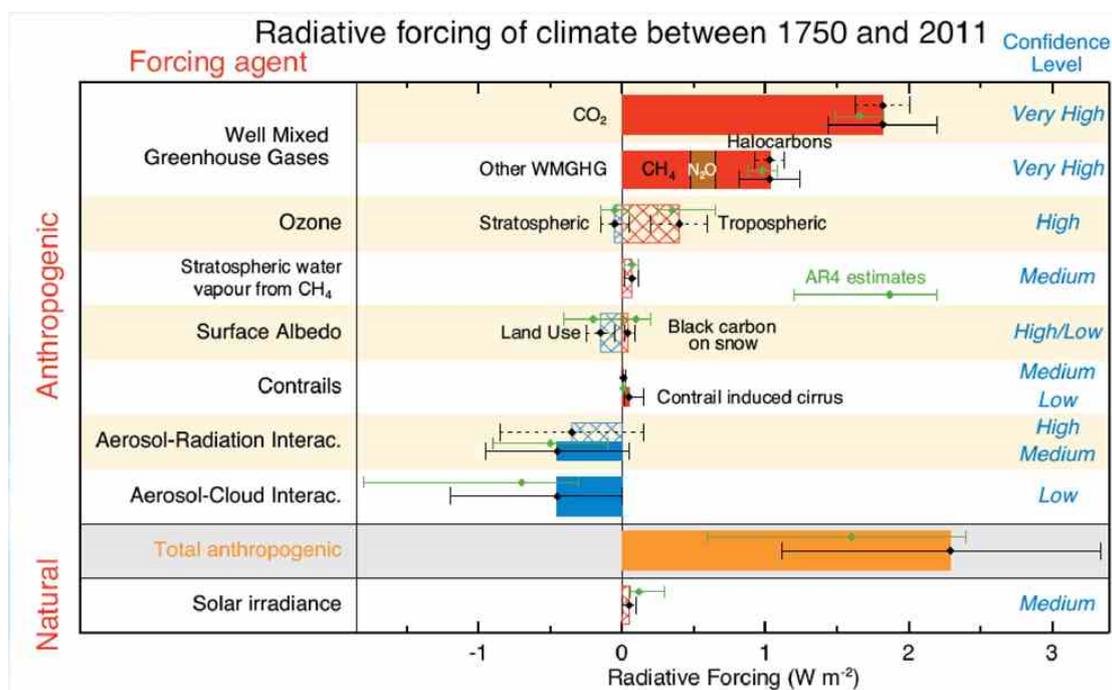
Par contre quand les particules sont brillantes, typiquement les sulfates, c'est l'inverse : ça va augmenter l'albédo et donc diminuer la quantité de rayonnement solaire absorbée par la surface.

Donc ces aérosols peuvent avoir un effet réchauffant ou refroidissant, en fonction de leur nature, mais globalement ils partagent tous la caractéristique d'être des espèces à durée de vie courte. D'accord? Ce sont toutes des espèces qui vont avoir une influence sur les échanges d'énergie dans l'atmosphère, qui sont des effets à raisonnablement court terme.

Donc ici vous avez un panorama des différentes substances qui sont émises dans l'atmosphère, et qui ont un effet essentiellement sur la réflexion du rayonnement solaire, sauf pour la suie (« soot » en anglais ou « black carbon »).

Mais sinon, pour l'essentiel, c'est des effets « refroidissant » de court terme.

2. Les gaz chauffent ; les aérosols refroidissent... Quel bilan ?



Diapositive 3.

Ce graphique que vous trouvez dans à peu près toutes les éditions des rapports du GIEC fait à ce moment un bilan de l'ensemble des effets réchauffant et refroidissant de toutes les substances que l'humanité met dans l'atmosphère.

Alors, l'unité qu'on utilise pour faire le bilan radiatif de l'atmosphère c'est des watts par mètre carré ($W m^{-2}$). On aurait pu utiliser des watts tout court, puisque l'atmosphère a une surface de contact avec le sol qui est donnée, qui est connue, c'est la surface de la Terre. Mais en l'occurrence – plutôt que de se balader avec des multiples des watts avec 10 puissance 12 dans tous les sens – en fait on préfère raisonner en termes de watts par mètre carré.

Alors si vous vous rappelez bien de la dernière fois – enfin remarquez, même si vous vous ne rappelez pas bien, je ne sais plus si j'ai donné l'ordre de grandeur... L'ordre de grandeur du rayonnement solaire qui parvient au sol est $200 W m^{-2}$. C'est un peu plus en fait mais, c'est de cet ordre de grandeur. L'ordre de grandeur de l'effet de serre naturel est un peu moins, c'est 170 de mémoire (watts par mètre carré). Et l'effet de serre additionnel est de l'ordre de 2 à $3 W m^{-2}$, si on fait les effets « plus » et « moins » au total.

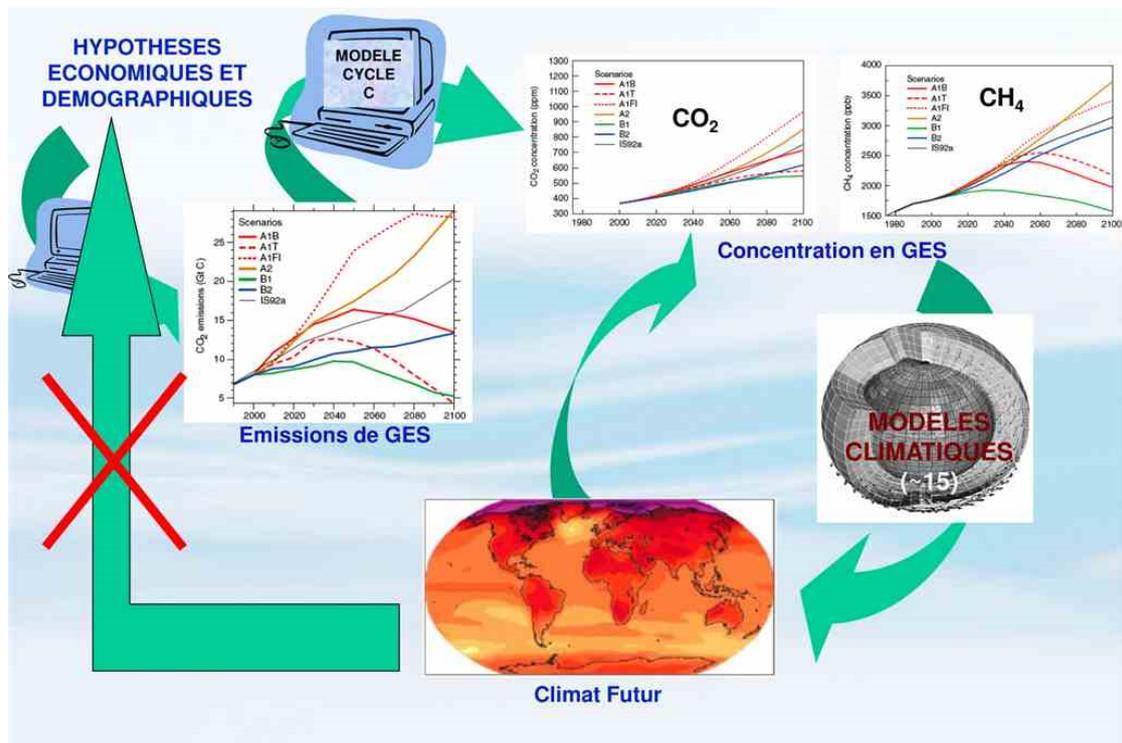
2. LES GAZ CHAUFFENT ; LES AÉROSOLS REFROIDISSENT... BILAN?

Donc ici vous avez les effets « plus », notamment, des gaz à effet de serre à longue durée de vie. Ici vous avez tout un tas d'effets, un peu « plus » ou un peu « moins ». Et ici vous avez la résultante avec la barre d'erreur, que vous voyez là. Et vous voyez que la barre d'erreur vient surtout de la partie aérosols. D'accord ? C'est surtout de là que vient la barre d'erreurs.

Donc l'effet global de l'Homme sur les échanges d'énergie entre l'atmosphère et la surface de la Terre est bien un effet de forçage positif, c'est-à-dire qu'on rajoute de l'énergie.

Mais vous avez dans cette histoire, encore une fois, les aérosols qui ont un effet qui est négatif, mais avec une ampleur mal évaluée pour un certain nombre d'entre eux.

3. Simuler le climat, pas plus fiable qu'un pronostic boursier ?



Diapositive 4.

Alors une fois qu'on sait qu'on a des effets réchauffant et refroidissant, je vais vous expliquer maintenant la logique d'une simulation climatique.

La logique d'une simulation climatique demande de mettre deux choses en entrée de la simulation. Elle demande de mettre en entrée la représentation du système physique, donc un modèle de climat, et elle demande de mettre en entrée l'hypothèse avec laquelle on va perturber ce système physique, c'est-à-dire des émissions.

Alors historiquement... J'ai conservé la présentation de cette manière parce que historiquement, c'était comme ça que c'était fait. Maintenant ça a un peu changé, je vais vous expliquer en quoi.

Historiquement, le cheminement qui était présenté était le suivant : on fait une hypothèse sur les émissions de gaz à effet de serre. Cette hypothèse est elle-même conditionnée par des hypothèses économiques et autres – popula-

3. SIMULER LE CLIMAT : PAS FIABLE ?

tion, etc. – et ça conduit à avoir des trajectoires possibles en ce qui concerne les émissions futures.

Alors notez une chose importante. C'est que dans le scénario d'émissions ainsi fait, les émissions résultent de l'économie qui appelle de l'énergie. Et donc par rapport à ce que je vous ai expliqué au premier cours, il y a une inversion de causalité dans la façon de faire le scénario. Puisque normalement : vous avez de l'énergie, et ça vous fait à la fois des émissions et de l'économie. D'accord ?

Donc la véritable hypothèse d'entrée n'est pas l'économie qui appelle l'énergie, mais l'énergie qui par ailleurs fait de l'économie. Qui fait des émissions mais qui fait aussi de l'économie.

Donc on devrait avoir deux sorties d'une même entrée, qui sont le PIB et les émissions, et non pas les émissions comme sortie du PIB. C'est clair ou non ? C'est exactement ce que j'ai expliqué au premier cours.

Il n'empêche que les scénarios d'émissions sont faits par des économistes, qui donc eux inversent la cause, et qui vous disent qu'il y a un PIB : ce PIB appelle de l'énergie. Enfin ils inversent le facteur limitant plus exactement.

Donc vous avez des scénarios d'émissions et ces émissions montent ou descendent. Ce sont des hypothèses par principe. Une fois que vous avez les émissions, vous faites rentrer ça dans un premier étage de modélisation – donc là vous avez déjà de la modélisation – dans laquelle vous avez des évolutions de la concentration en gaz à effet de serre – parce qu'en fait le vrai forçage du climat, c'est l'évolution de la concentration en gaz à effet de serre.

Si vous avez des émissions qui augmentent et que dans le même temps les puits augmentent, votre concentration ne bouge pas, et donc il n'y a pas de forçage du système climatique. Pour qu'il y ait un forçage du système climatique, il faut que ce soit l'épaisseur de la couverture, c'est-à-dire la concentration qui augmente.

Alors aujourd'hui dans les rapports qui sont présentés par le GIEC, ce que vous avez est directement des évolutions sur la concentration. Donc quand vous voyez écrit « RCP » quelque part, maintenant, dans les documents scientifiques qui parlent de simulations climatiques, ça veut dire « Representative Concentration Pathway ». Et donc ce sont directement des hypothèses qui sont faites sur l'évolution de la concentration. Et de là on dérive les scénarios d'émissions possibles.

3. SIMULER LE CLIMAT : PAS FIABLE ?

Cette évolution de la concentration est donc donnée en entrée d'un modèle de climat, et ce modèle de climat va faire « aïe » plus ou moins fort, et il va vous dire comment il fait « aïe ». D'accord ? On va passer beaucoup de temps aujourd'hui à regarder ça. Donc il va vous dire « ça chauffe », « ça brûle ici », « ça se refroidit là », « ça fait mal », et « ici je me prends une inondation », « là un ouragan », « l'ouragan c'est plus compliqué », etc.

Donc le modèle de climat va vous dire ce qu'il voit dans l'évolution du système climatique. Dans les modèles les plus avancés, maintenant, il y a une rétroaction entre la concentration et le modèle de climat.

Alors un exemple : si vous avez un climat qui dérive de manière trop rapide et les écosystèmes qui ne peuvent pas suivre, une partie des puits à CO₂ s'affaiblissent, les écosystèmes meurent, donc vous avez moins de photosynthèse, le CO₂ est moins bien repris de l'atmosphère, et du coup, à émissions identiques, vous avez la concentration qui augmente plus vite. Ces phénomènes d'asservissement sont pris en compte dans les modèles les plus récents.

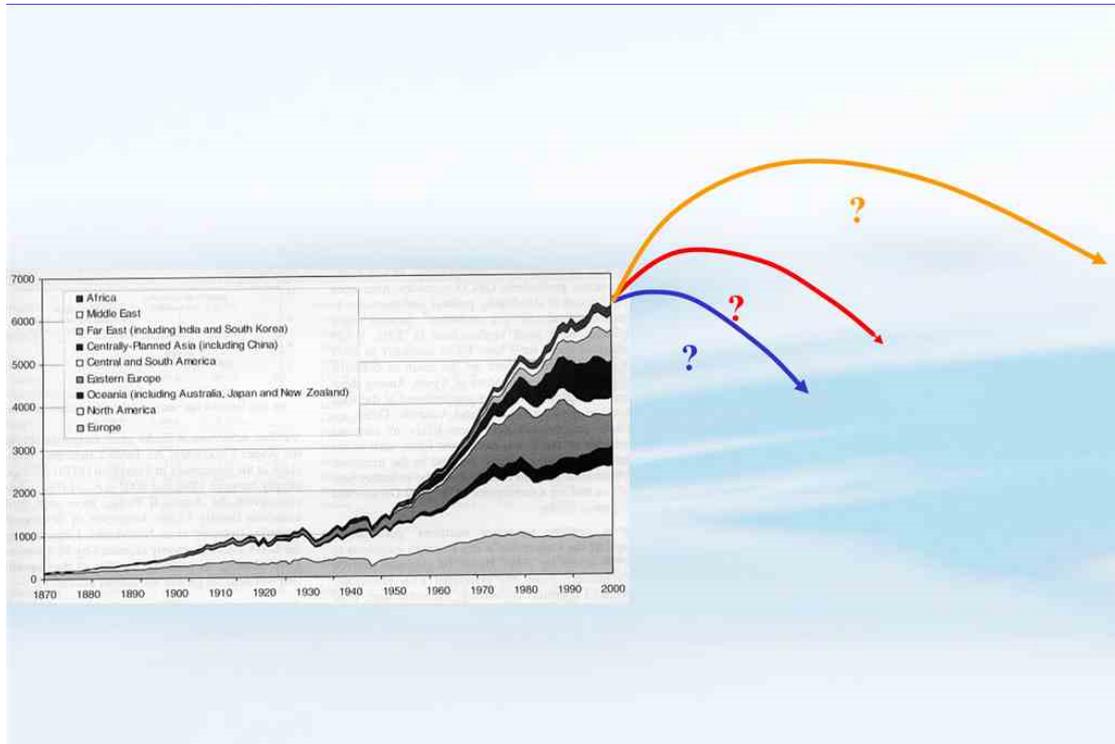
Par contre ce que même les modèles les plus récents ne prennent pas en compte, et ne prendront à mon avis jamais en compte – même ceux qui prétendent faire du couplage avec l'économie – c'est la rétroaction sur les hypothèses d'entrée. C'est-à-dire qu'il y a pas un modèle qui vous dit : « Là, le système climatique a dérivé tellement vite, que ce n'est pas compatible avec le fait qu'on maintienne le PIB actuel. » Il n'y a aucun modèle de climat qui raconte ça.

Avec donc cette particularité, ou cette bizarrerie, les simulations qui vous donnent les résultats les plus désagréables en ce qui concerne le réchauffement climatique vont avec les scénarios d'émissions les plus importants, qui dans la façon dont ils sont rédigés aujourd'hui, vont aussi avec l'économie qui se porte le mieux.

Donc on a quelque chose d'un peu étonnant : plus le système climatique se dérègle, mieux l'économie se porte. C'est ça que vous avez, chronologiquement, dans la façon dont sont faites aujourd'hui les simulations. Je répète ou c'est clair ? Il faut les émissions les plus importantes, donc l'économie dans les histoires racontées qui va le mieux, pour que le climat se dérègle plus.

Ce qui est une autre manière de dire que le climat ne peut jamais, dans la façon dont les simulations sont faites, porter atteinte au système économique. Par construction.

4. Et après ?



Diapositive 5.

Alors, ce que seront les émissions futures est évidemment impossible à prédire. Moi je ne sais pas prédire combien il y aura d'hommes dans 40 ans. Je ne sais pas prédire combien il y aura de pétrole par personne, et de gaz, et de charbon par personne. Et je ne sais pas prédire combien les gens mangeront de viande par personne.

Tout ce que je sais dire, c'est que si c'est extrêmement différent de ce qui se passe aujourd'hui, c'est qu'il y aura déjà eu une catastrophe qui se sera chargée de réguler rapidement le système. C'est la seule chose que je sais dire. Mais sinon, je ne sais pas le prédire.

Alors les gens qui font des simulations ne savent pas prédire, alors ils font des scénarios. Donc ils prennent plusieurs possibilités. Et dans ce que je vais vous montrer à partir de maintenant, les résultats seront toujours sous condition de l'hypothèse qu'on a prise en entrée.

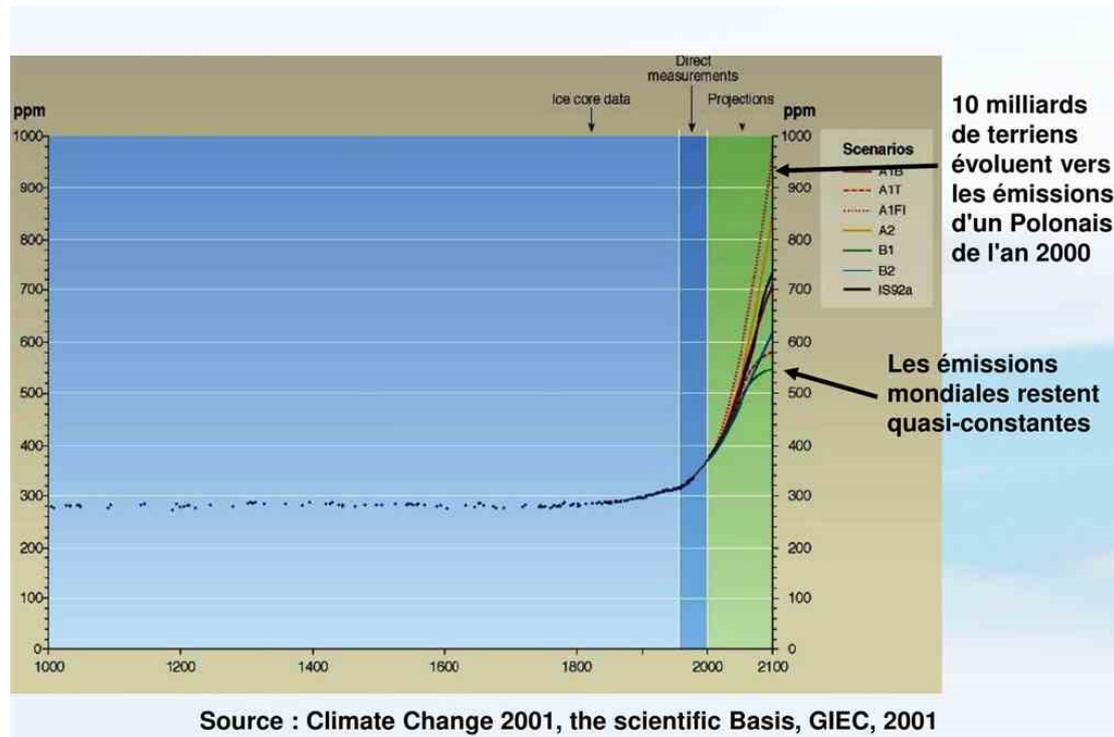
4. ET APRÈS ?

C'est quelque chose d'essentiel : il faut bien comprendre que les résultats que vous allez voir à partir de maintenant sont toujours sous conditions des émissions, et du coup – puisque je pense que je ne redonnerai pas le sujet cette année – une des raisons pour lesquelles il est impossible de prévoir de manière exacte les risques du changement climatique est notamment qu'il est impossible de prévoir de manière exacte ce que seront les émissions.

J'avais posé la question à vos copains de l'année dernière : « Pourquoi est-ce qu'il est impossible de prévoir de manière exacte les risques du changement climatique ? » Je pense qu'il n'y en a qu'un sur cinq – dans les copies que j'ai déjà réussi à corriger – qui m'a sorti que c'est parce que les émissions n'étaient pas prévisibles. Voilà : ou bien les quatre autres roupillaient, ou bien ce jour-là ils n'étaient pas en forme.

Donc, comme on ne peut pas prévoir les émissions, on ne pourra jamais prévoir de manière exacte les conséquences.

5. J'émet, l'atmosphère concentre



Diapositive 6.

Voici ce que donne une mise en perspective du premier étage de la modélisation, c'est-à-dire passer des émissions à la concentration.

Encore une fois, je rappelle qu'on fait le chemin à l'envers. D'abord on a des « RCP », et de là on dérive les trajectoires possibles sur les émissions. C'est comme ça que ça se fait aujourd'hui.

Vous avez ici, donc, une mise en perspective de la concentration – en l'occurrence le plus important d'entre eux – de CO₂ dans l'air. Celle que vous aviez avant que nous nous amusions avec les moteurs à combustion interne et les machines à vapeur. Celle qui a commencé à se déformer jusqu'à la fin du 20^e siècle.

Et ici, vous avez les évolutions possibles au cours du 21^e siècle. Mais vous voyez que ces évolutions possibles sont très différentes en fonction des scénarios d'émissions.

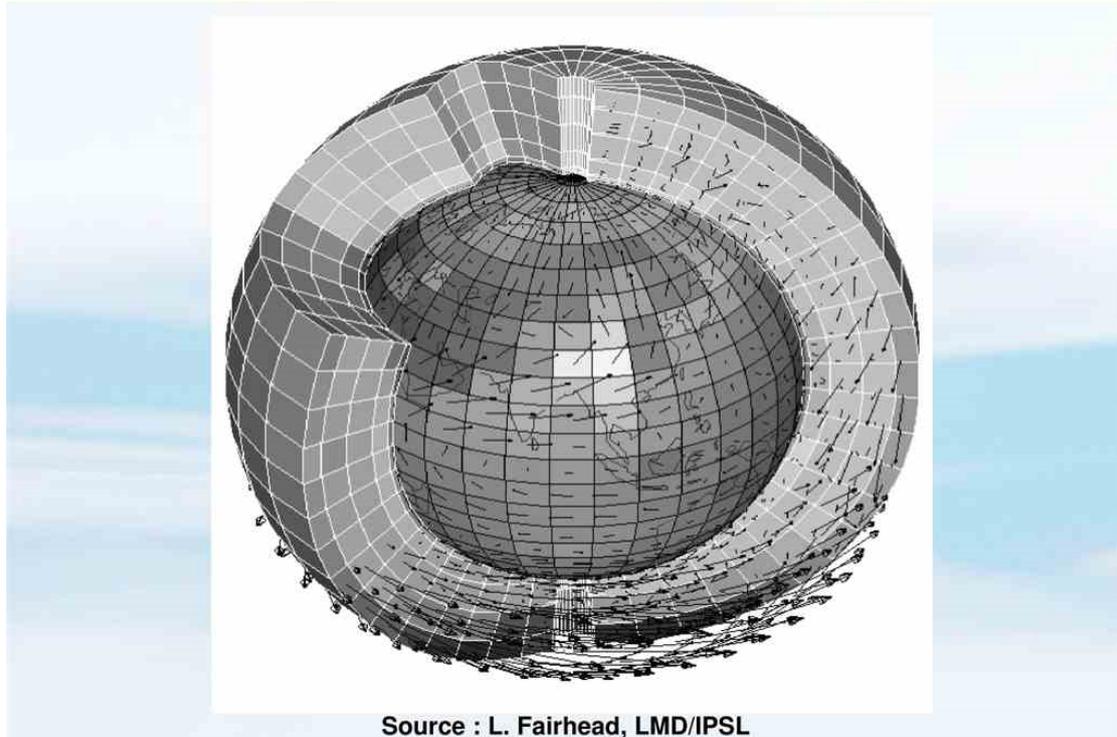
5. *J'ÉMETS, L'ATMOSPHERE CONCENTRE*

Alors le scénario bas, jusqu'à maintenant, je le prends comme des émissions qui restent constantes. Alors en fait, il faudrait que je vous présente le scénario 1,5 °C par exemple. En fait, le scénario du 1,5 °C, en gros, c'est ce qu'on a déjà émis. Donc ce ne sont pas les émissions qui restent constantes. Ce sont des émissions qui deviennent nulles demain matin. C'est ça le scénario 1,5 °C.

Des émissions qui restent constantes, jusqu'à des émissions qui sont très fortement augmentées... Alors, jusqu'à maintenant j'avais coutume d'appeler ça mon scénario « Polonais de l'an 2000 ». Pourquoi « Polonais de l'an 2000 » ? Parce que le Polonais est l'Européen qui se repose encore aujourd'hui le plus sur le charbon, en proportion. Or ce qui reste à extraire du sous-sol, c'est avant tout du charbon. Et par ailleurs, « de l'an 2000 », parce que ce scénario correspond à effectivement la consommation de 10 milliards de terriens qui utiliseraient, par personne, la même quantité d'énergie qu'un Polonais d'aujourd'hui. C'est pour ça que je l'avais appelé comme ça, et ça permet un peu de se figurer en termes socio-économiques ce que signifie un tel scénario d'émissions.

Donc en fait, ça veut juste dire une humanité de 10 milliards d'individus qui considère que ce qui est acceptable, ce qui est normal, ce qui est standard, c'est de vivre comme un Polonais de l'an 2000. Si on a ça, à la fois en termes de consommation d'énergie et de performances techniques, on arrive à un scénario d'émissions qui vous donne cette concentration en CO₂ à la fin du 21^e siècle, pour vous donner une idée.

6. Qu'est-ce qu'un modèle climatique?



Diapositive 7.

Une fois qu'on a une évolution de la concentration en CO₂, on la met dans un modèle de climat.

Qu'est-ce qu'un modèle de climat?

C'est une planète virtuelle – au lieu d'être « flight simulator » c'est « climate simulator ». Et cette planète virtuelle – qui est donc un modèle numérique qui fonctionne sur ordinateur – est nécessairement un modèle discret parce que vous savez que même très puissants les ordinateurs n'aiment pas l'infini. Tout ce qu'ils savent faire c'est gérer un nombre fini d'opérations ou un nombre fini de points. Oui?

*** Question auditoire sur un scénario basé sur la Chine d'aujourd'hui ***
On peut toujours faire des scénarios pires, il n'y a aucun problème. Je dis juste : celui-là en l'occurrence correspond à un Polonais de l'an 2000 appliqué à dix milliards d'individus.

6. QU'EST-CE QU'UN MODÈLE CLIMATIQUE?

*** Intervention auditoire ***

C'est moi qui ai choisi ça. C'est pour illustrer. Parce que vous, vous avez, encore aujourd'hui, un niveau de vie qui est supérieur à celui d'un Polonais. Je dis que si 10 milliards de terriens veulent vivre un peu moins bien que vous, ça donne ça comme scénario d'émissions. Ou avec le niveau de confort matériel que vous avez aujourd'hui pour être plus précis, voilà ce que ça donne comme niveau d'émissions. Et donc comme niveau de concentration. C'était pour illustrer ça.

Donc je disais, un modèle de climat c'est une représentation numérique de la planète, c'est un modèle. Et donc par construction c'est quelque chose qui est discret. Donc il y a des mailles.

Voilà comment ça fonctionne : on découpe tous les compartiments fluides de la planète en boîte à chaussures, c'est-à-dire en parallélépipèdes – ou presque, parce qu'ils sont un peu courbes. Ce sont des parallélépipèdes pour clown ou pour personne ayant les pieds très plats, parce que typiquement la longueur sur l'horizontale est quelques dizaines à 100 km, on va dire 100 km en ordre de grandeur. Par contre l'épaisseur sur la verticale est plutôt de l'ordre de la centaine de mètres. Donc ce sont des pieds très, très plats.

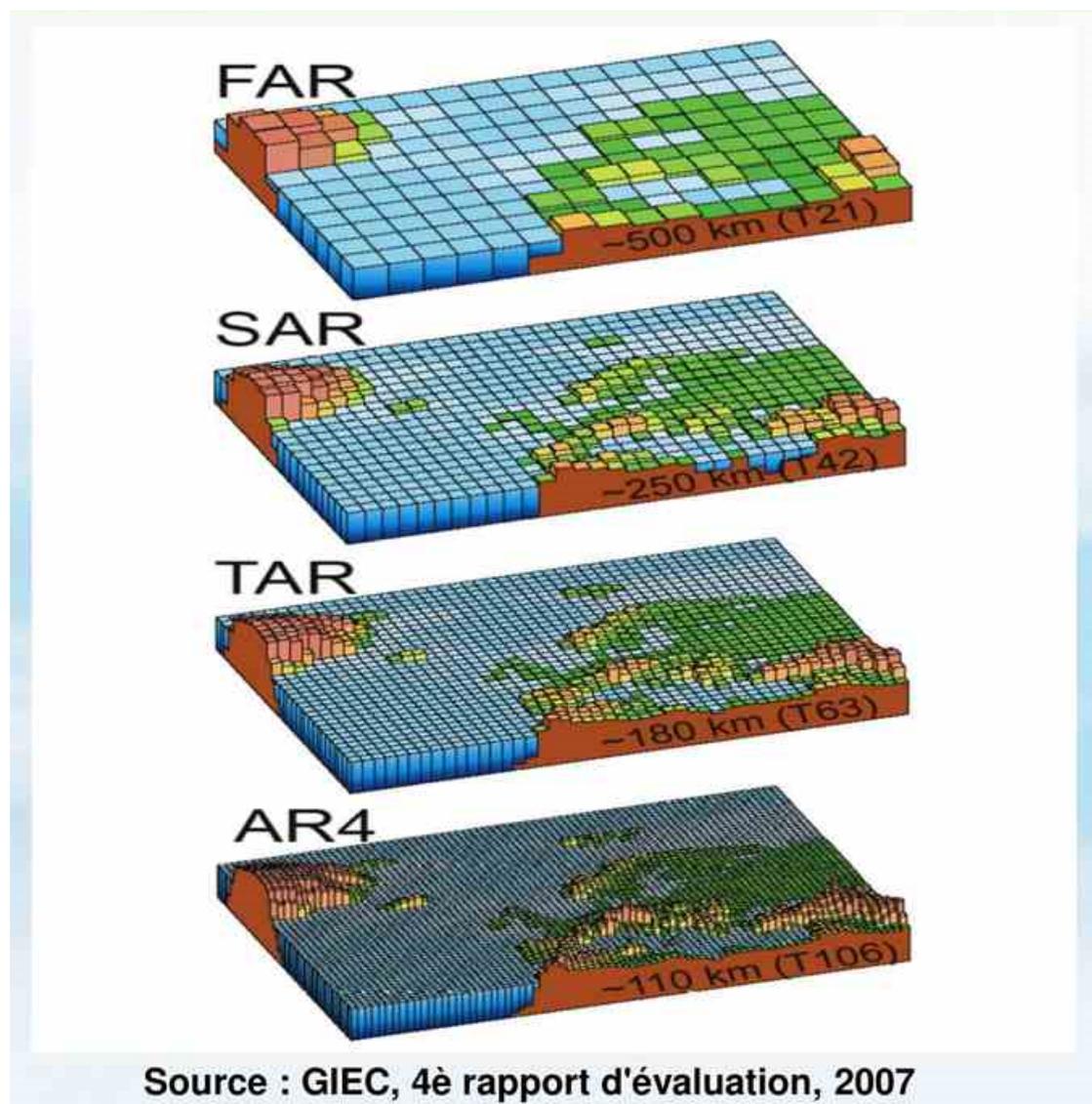
Mais sinon c'est ça l'idée : on va découper l'atmosphère et l'océan en boîtes à chaussures, et on va, en ce qui concerne le sol, le représenter par des mailles là aussi. Avec des propriétés d'échanges avec l'atmosphère qui sont différentes selon qu'il s'agit d'eau ou de terre, à l'évidence.

Ces modèles ont été sophistiqués au cours du temps mais tous reposent sur les équations de base de la physique.

Et alors un truc important... C'est que ça peut paraître très étonnant au début parce qu'on se dit : « Tiens, ce n'est pas comme ça qu'on a l'habitude de faire les expériences. » Mais un truc qui est très important à savoir, c'est que ce qu'on regarde avec ces modèles, c'est la façon dont ils convergent avec des concentrations en gaz à effet de serre données. Et ça ne dépend pas de l'état initial avec lequel on les paramètre. Dit autrement, ces modèles, que la température moyenne, l'année zéro, soit 15, 16 ou 17 °C, ce n'est pas le sujet.

En fait, ce qu'on va regarder c'est comment ils convergent au cours du temps, avec ce qu'on leur a donné comme évolution sur la quantité de gaz à effet de serre comprise dans l'atmosphère.

7. Amélioration en complexité, mais aussi en résolution



Diapositive 8.

Donc, ces modèles se sont améliorés au cours du temps.

La première chose qu'ils ont faite est que la maille... Parce qu'en fait, ils s'améliorent à mesure que la puissance informatique disponible augmente. Vous savez que traditionnellement, les organismes météo font partie des acheteurs

7. AMÉLIORATION EN COMPLEXITÉ, MAIS AUSSI EN RÉOLUTION

des supercalculateurs. Les gens qui aiment bien les ordinateurs de très grosse puissance, ce sont les gens qui font de la météo. Et en ce qui concerne les modèles de climat, ils tournent avec une partie atmosphérique qui est exactement celle de la météo. Alors ce sont des mailles moins fines, mais ce sont les mêmes équations.

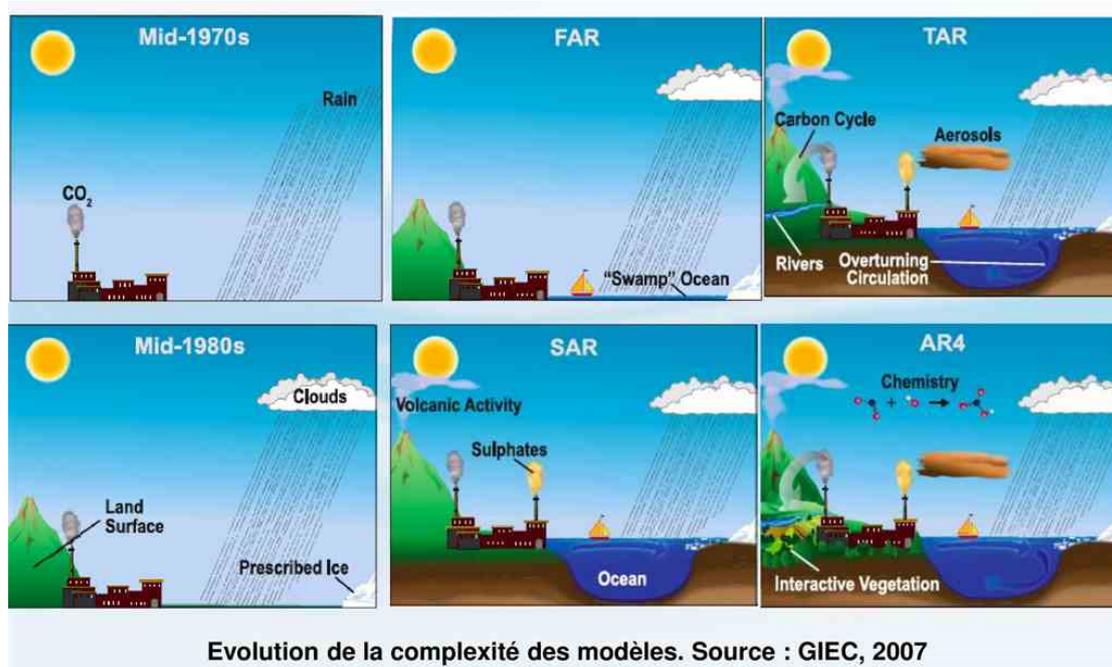
Les quatre acronymes, ou les quatre sigles, que vous avez ici, sont représentatifs des quatre premiers rapports d'évaluation du GIEC. F pour « First Assessment Report », S « Second », T « Third », et comme on avait déjà utilisé F pour « First », on n'a pas réutilisé F pour « Fourth », donc on a mis « AR4 ». Quand même, on s'est dit que des fois qu'il y ait des gens qui confondent, ce n'est pas complètement impossible.

Vous voyez deux choses. D'abord, la taille de la maille a très nettement diminué. Et la deuxième chose que vous voyez, c'est qu'il y a du relief qui est apparu. C'est-à-dire qu'initialement le sol était plat, et en fait, ce qui était différencié étaient l'eau et la terre. Et sur la terre, vous aviez la végétation et la terre non-recouverte qui était différenciées, mais ce n'était pas différencié au niveau du cycle du carbone. C'était surtout différencié au niveau de l'albédo, c'est-à-dire le pouvoir de réflexion de la surface. Et puis vous voyez qu'avec le temps du relief apparaît. C'est-à-dire qu'on fait apparaître une capacité à différencier en altitude ce qui occupe une maille. Si c'est de l'atmosphère ou si c'est du sol. Oui ?

*** Question auditoire ***

Non, c'est lié au fait que, sur le premier, vous voyez que c'est plat. Oui, il y a un petit machin à droite si vous voulez. Ah oui, effectivement, à gauche vous avez du relief, excusez-moi. Mais c'est du relief qui reste très grossier. Vous avez raison.

8. Les modèles font aussi l'objet d'améliorations continues!



Diapositive 9.

La deuxième chose en ce qui concerne les modèles, c'est qu'au fur et à mesure ils se sont complexifiés en ce qui concerne les processus qui sont pris en compte.

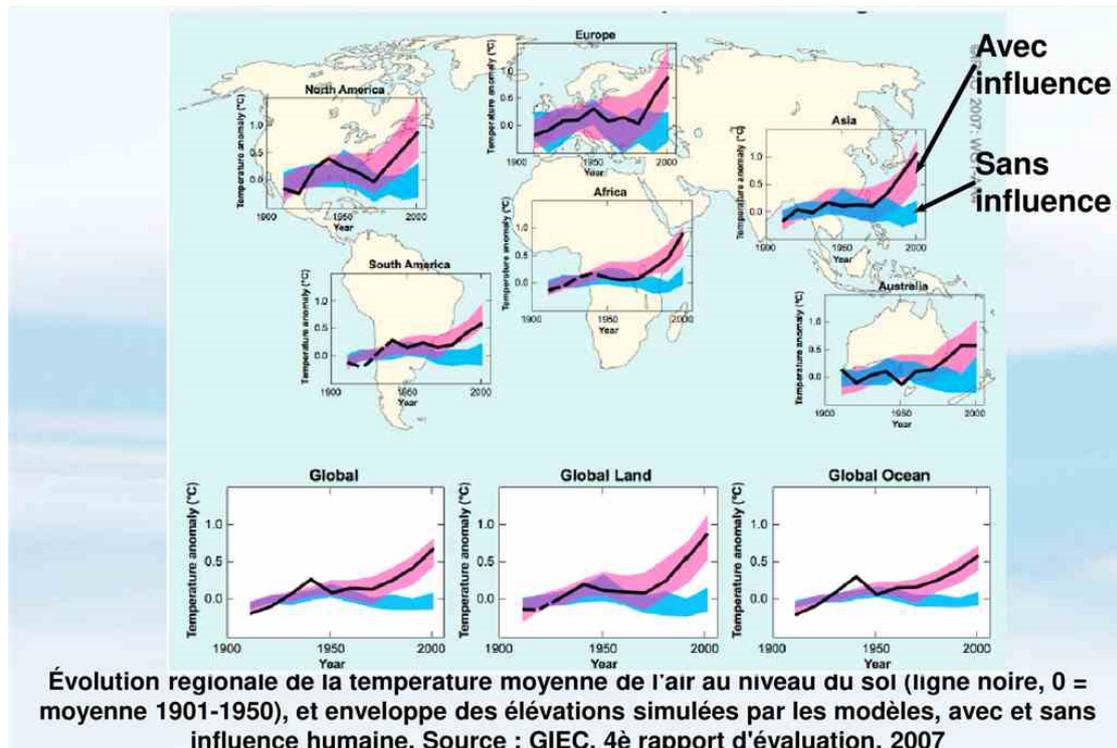
Au moment de la première génération de modèles – j'ai envie de dire – ils étaient essentiellement atmosphériques. Et le reste des compartiments de la planète n'apparaissait pas. Et donc les échanges avec l'océan étaient paramétrisés. C'est-à-dire qu'il n'y avait pas de dynamique océanique. L'océan était vu comme une surface d'échange avec la planète, et les échanges étaient paramétrisés.

Et puis au fur et à mesure que les générations de modèles avancent, vous vous mettez à avoir de plus en plus de compartiments qui apparaissent. Donc vous avez un océan. Vous avez de la végétation. L'océan se met à devenir dynamique. Vous avez les aérosols. Et maintenant, dans les modèles les plus récents, vous avez l'essentiel de ce qui se passe dans l'atmosphère – enfin sur la Terre plus exactement, donc dans l'atmosphère et dans l'océan. Vous voyez évidem-

8. LES MODÈLES FONT AUSSI L'OBJET D'AMÉLIORATIONS CONTINUES!

ment la couverture nuageuse qui est apparue. Maintenant, il y a de la chimie atmosphérique. Vous avez le cycle du carbone, etc. Vous avez l'essentiel des grands processus qui sont représentés.

9. Des modèles testés avant d'être « vendus »



Diapositive 10.

Quelque chose d'intéressant à noter, soit dit en passant, est que l'amélioration de ces modèles, à aucun moment, n'a jamais changé fondamentalement les ordres de grandeur sur l'élévation de température qui résulte d'une augmentation donnée de la concentration en CO_2 dans l'atmosphère.

Tout simplement parce que cette élévation de température résulte au premier ordre de la quantité d'énergie supplémentaire qui est envoyée vers le sol par un supplément d'effet de serre. Et ça relève d'un processus physique assez bien compris d'absorption-réémission par un gaz. D'accord ?

Une fois que vous avez la quantité d'énergie totale qui retourne au sol, et que vous savez faire le « split » entre ce qui est absorbé par l'océan et ce qui est absorbé par le sol, au premier ordre, vous avez assez facilement votre élévation de température du sol.

Donc la sophistication des modèles permet de mieux approcher un certain nombre de phénomènes locaux. Notamment, elle permet d'améliorer la résolu-

9. DES MODÈLES TESTÉS AVANT D'ÊTRE « VENDUS »

tion spatiale sur ce qui va se passer. Par contre, elle n'a pas changé au premier ordre – j'insiste – les conséquences globales de ce qui va se passer, et notamment l'élévation de température moyenne, qui représente l'élévation de la quantité d'énergie contenue dans le système.

Les modèles climatiques – comme tous les modèles quand ils sont utilisés par des gens qui savent à peu près ce qu'ils font – la première chose qu'on fait une fois qu'on les a mis au point, c'est de les tester sur le passé. Quand vous avez un modèle, la première chose que vous faites pour vérifier que ça marche est de le confronter à ce qui s'est passé auparavant. Au passage, il n'y a pas un modèle économique qui passe la rampe de ce genre de truc, sauf si vous modifiez les paramètres année après année pour être sûr que ça colle, mais sinon ça ne marche pas.

En ce qui concerne les modèles physiques, c'est exactement comme ça qu'ils sont calibrés. Et donc c'est exactement comme ça qu'on calibre les modèles de climat. Ce que vous voyez ici – comme dans tout graphique du GIEC, il y a énormément d'informations – c'est la façon dont un ensemble de modèles – de mémoire il y en a une vingtaine là-dedans – se confrontent à ce qui a été observé en ce qui concerne l'évolution des températures.

Donc, en ce qui concerne l'évolution des températures, sur chacun des graphiques, qui représentent soit une zone, ici, soit l'ensemble du monde des terres émergées ou des océans, en bas, vous avez ce que vous racontent les modèles quand on les laisse évoluer avec une évolution des gaz à effet de serre qui a été ce qu'elle est (en rose). Vous avez en noir ce qu'ont vraiment donné les relevés de température, partout.

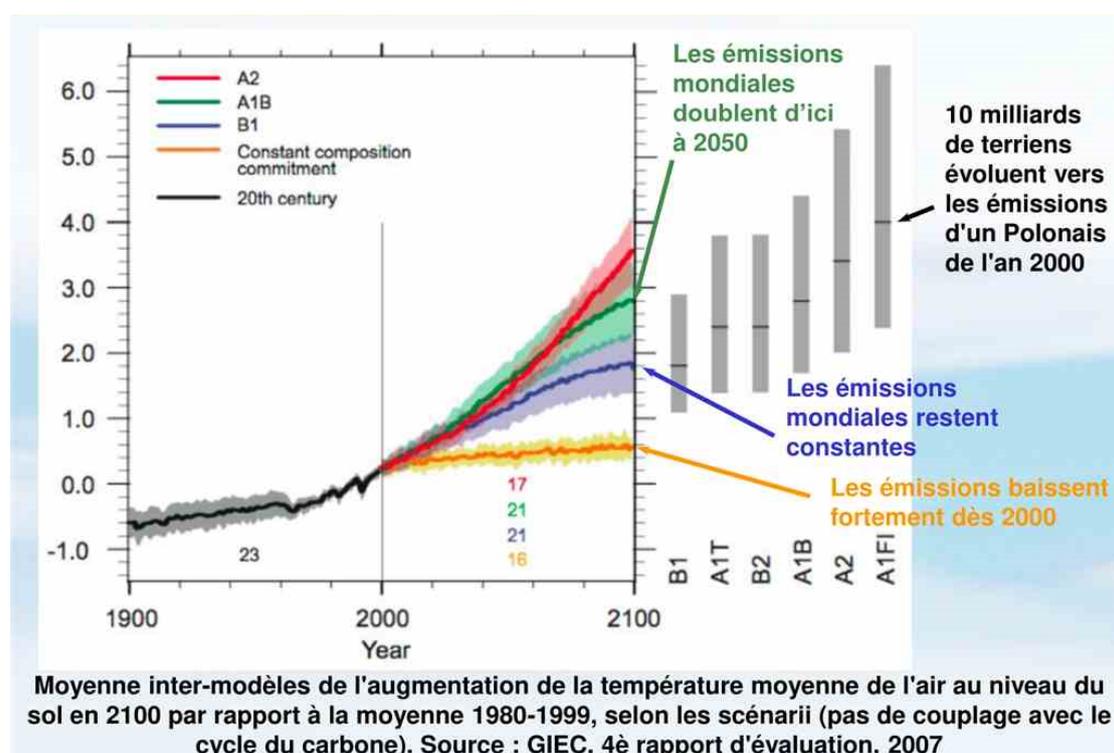
Et donc ce que vous voyez, c'est qu'à quelques anomalies près, à cette époque-là, par exemple sur l'océan – ils se répètent un peu sur le global, là – les modèles vous reproduisent assez bien la tendance générale sur la variation des températures sur la période.

Alors, les mêmes modélisateurs se sont amusés à regarder ce qu'aurait donné le modèle – qui reproduit ce qui s'est passé – si les émissions de gaz à effet de serre n'avaient pas augmenté. Et à ce moment, ça vous donne la courbe bleue. Enfin plus exactement l'enveloppe bleue. Donc l'enveloppe bleue est l'enveloppe de toutes les simulations qui sont faites avec des modèles de climat dans un monde virtuel où les Hommes n'ont pas émis de gaz à effet de serre. Et à ce moment, vous voyez que globalement les températures restent à peu près constantes. Le système est à peu près stable, alors que quand vous mettez les émissions de gaz à effet de serre, le système dérive.

9. DES MODÈLES TESTÉS AVANT D'ÊTRE « VENDUS »

Ce genre de test est absolument indispensable pour accorder de la crédibilité à ces outils numériques pour ce qu'ils vont raconter pour plus tard. Je ne vous l'ai pas amené aujourd'hui, mais vous trouvez sur internet – c'est pour ceux d'entre vous qui iront chercher – des simulations, alors là pour le coup en temps réel, de ces modèles de climat qui simulent la Terre vue de l'atmosphère. Il y a une comparaison entre des images satellites réelles d'un côté, et une représentation avec un modèle numérique de l'autre. Et quand vous comparez les deux – faites le test avec quelqu'un en double aveugle – en général, les gens ne savent pas dire lequel est lequel. D'accord? Aujourd'hui, il y a également une qualité de représentation extrêmement fine en ce qui concerne la capacité de ces modèles à représenter visuellement le système.

10. J'y mets mes scénarios d'émission dans les modèles : quid ?



Diapositive 11.

On va donc parler d'avenir, avec ces modèles, une fois qu'ils ont été capables de retracer le passé.

Ce que vous avez ici est à nouveau un graphique qui est issu du dernier gros rapport du GIEC – de l'avant-dernier pardon, 2007, pas 2013, mais ça n'a pas tellement changé dans le dernier. L'intérêt de ce graphique est que ça vous discrimine très précisément la manière dont la température peut évoluer en fonction du scénario d'émissions. C'est ça l'idée qu'il faut avoir en tête.

Donc vous voyez ici l'évolution de la température sur le 20^e siècle. Vous constatez :

- que l'évolution de la température sur le 20^e siècle, c'est déjà une fraction de degré qui a été gagnée ;
- et puis, la façon dont la température évolue à l'avenir en fonction de l'hypothèse qu'on fait sur les émissions de gaz à effet de serre.

10. J'Y METS MES SCÉNARIOS D'ÉMISSION DANS LES MODÈLES : QUID ?

Alors, l'hypothèse la plus basse dans ces simulations est que la concentration reste constante. Ce qui veut dire que, en gros, les émissions se mettent à décroître très, très rapidement à partir de demain matin, et elles deviennent nulles bien avant la fin du siècle. Donc là, effectivement, vous voyez qu'on tient les 1,5 °C.

Donc là, vous avez 1 °C ; on était parti à peu près de là ; on tient les 1,5 °C. Dit autrement pour tenir les 1,5 °C, il faut que les émissions se mettent à diminuer très vite à partir de demain, et soient nulles bien avant la fin du siècle. C'est ça que ça veut dire de tenir les 1,5 °C. Et on n'est pas partis pour le faire.

Après, vous avez ici un scénario dans lequel on garde des émissions constantes, en gros. Alors vous voyez que c'est un scénario dans lequel on gagne 2 °C par rapport à 1990, que vous avez ici, mais on en gagne déjà quasiment 3 par rapport à l'ère préindustrielle.

Donc ce que vous avez là est un scénario qui est quasiment 3 °C. Ce que vous voyez ici, c'est l'enveloppe pour ce scénario de toutes les simulations, de tous les modèles. Dit autrement, les vingt modèles utilisés avec ce même scénario, le plus conservateur vous dit : « on va gagner 1 °C par rapport à 1990 », et le plus pessimiste vous dit : « on va gagner 3 °C par rapport à 1990 ».

Ce graphique vous dit qu'il reste une variabilité liée aux hypothèses qu'on a faites dans le modèle parce qu'entre tous les modèles vous n'avez pas exactement les mêmes options qui sont prises pour la représentation d'un certain nombre de processus, ou plus exactement, pour les valeurs prises pour les paramètres ou les conditions aux limites d'un certain nombre de processus. Parce que vous avez des trucs qui restent paramétrisés là-dedans. Et évidemment, on essaie d'ajuster les paramètres en fonction des observations passées et ainsi on essaie de recalibrer le modèle en permanence.

Donc en fonction du modèle qui est utilisé, vous voyez que vous avez quand même une part d'erreur qui est de l'ordre de 2 °C sur ce scénario-là sur l'élévation de température que vous avez à l'arrivée. Donc on n'est pas tout à fait dans l'épaisseur du trait parce que vous allez voir que les conséquences liées au changement climatique, ne sont pas du tout les mêmes à 1 °C et à 3 °C.

Le scénario intermédiaire, ici, est un scénario qui est considéré comme un scénario charbon – au moins dans mon jargon. C'est-à-dire que les émissions doublent. Et alors là toujours pareil, ce qui correspond à ce scénario est là, et donc dans la version basse on n'est qu'à 1,5 °C mais dans la version haute on est à plus de 4 °C.

10. J'Y METS MES SCÉNARIOS D'ÉMISSION DANS LES MODÈLES : QUID ?

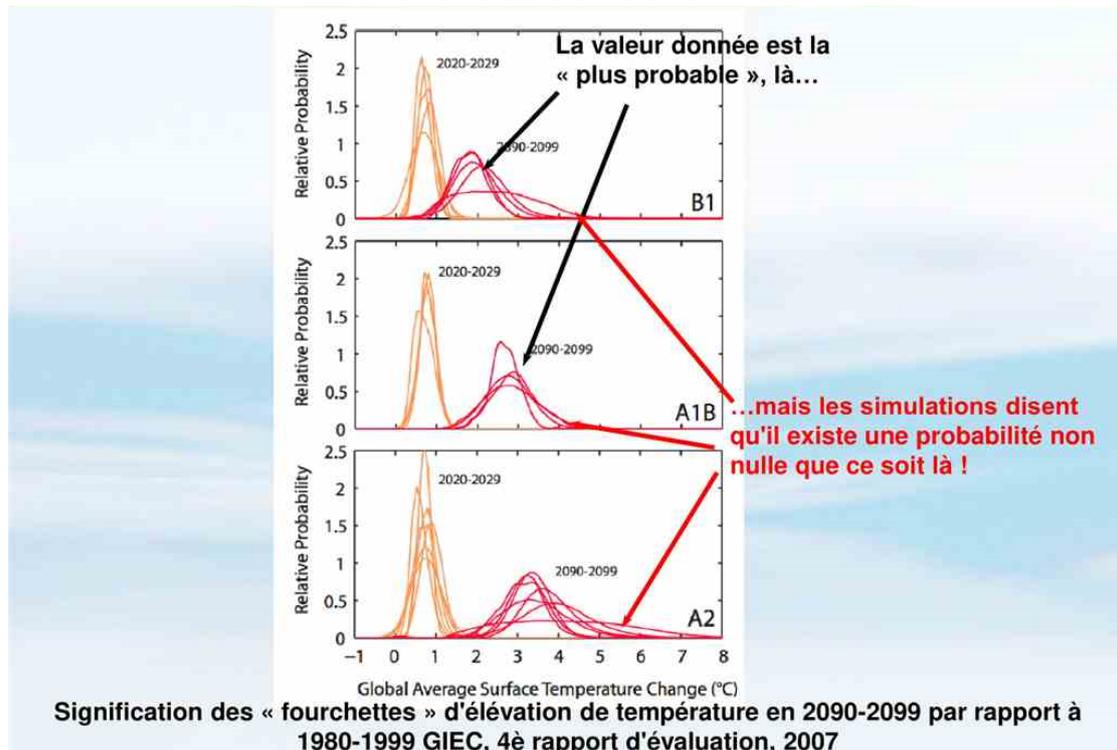
Alors, très souvent, il y a une erreur qui est faite en face de ce genre d'incertitude qui est de se dire : « S'il subsiste une grande incertitude sur le fait qu'on coure un grand danger, alors je vais attendre d'en savoir plus pour être sûr que vraiment c'est un grand danger. »

Alors le parallèle que je vais prendre, c'est si un de vos copains, un jour où il a beaucoup bu, vous demande de traverser les Champs-Élysées à cinq heures du matin, les yeux bandés. Je pense qu'il y a une grande incertitude sur le fait que vous allez mourir ou pas. Je suis pas complètement sûr que vous allez le faire. Donc en fait, une grande incertitude est représentative, au contraire, d'un grand risque. S'il y a une grande incertitude, ça veut dire que je ne suis pas capable de vous donner une borne supérieure sur ce que vous risquez. D'accord ?

Donc, l'idée qu'une grande incertitude est une grande police d'assurance qui signifie qu'il est urgent de ne rien faire : c'est l'exact inverse de la conclusion qu'il faut tirer. Une grande incertitude est un grand risque. Un très grand risque.

Et enfin, mon scénario « Polonais » est un scénario dont vous voyez qu'il peut nous emmener au-delà de 6 °C avec la génération de modèles qui étaient utilisés à cette époque-là. Alors maintenant, on a coutume de dire que c'est plutôt 5, mais enfin ça ne change pas beaucoup les conclusions que vous allez avoir derrière. Vous comprenez donc, là, que vous avez une dispersion, encore une fois, liée au modèle qu'on utilise pour un même scénario.

11. Existe-t-il réellement un haut de fourchette?



Diapositive 12.

Une autre manière de présenter la même chose est que quand on fait une simulation, on peut faire deux choses en fait. Oui?

*** Question auditoire sur la date de référence pour l'évolution 2 °C ***
Non, c'est à partir de 1850. Et donc, il y en a déjà 1 [degré] qui a été embarqué. Donc, en gros, il faut que les émissions deviennent nulles demain matin. En ce qui concerne la façon de comprendre ça, je vais vous le montrer autrement.

Pour un même modèle, vous pouvez faire plusieurs simulations avec des petits changements de paramètres dans le modèle. Et évidemment, à chaque fois ça va vous donner une valeur un peu différente. Donc vous allez avoir une distribution des résultats, et vous considérez que la valeur que vous allez retenir est le sommet de votre gaussienne – si jamais vos résultats sont distribués de façon à peu près normale.

Ou bien, vous pouvez aussi considérer que pour une famille de modèles, vous allez regarder les sommets des gaussiennes pour chacun des modèles, et

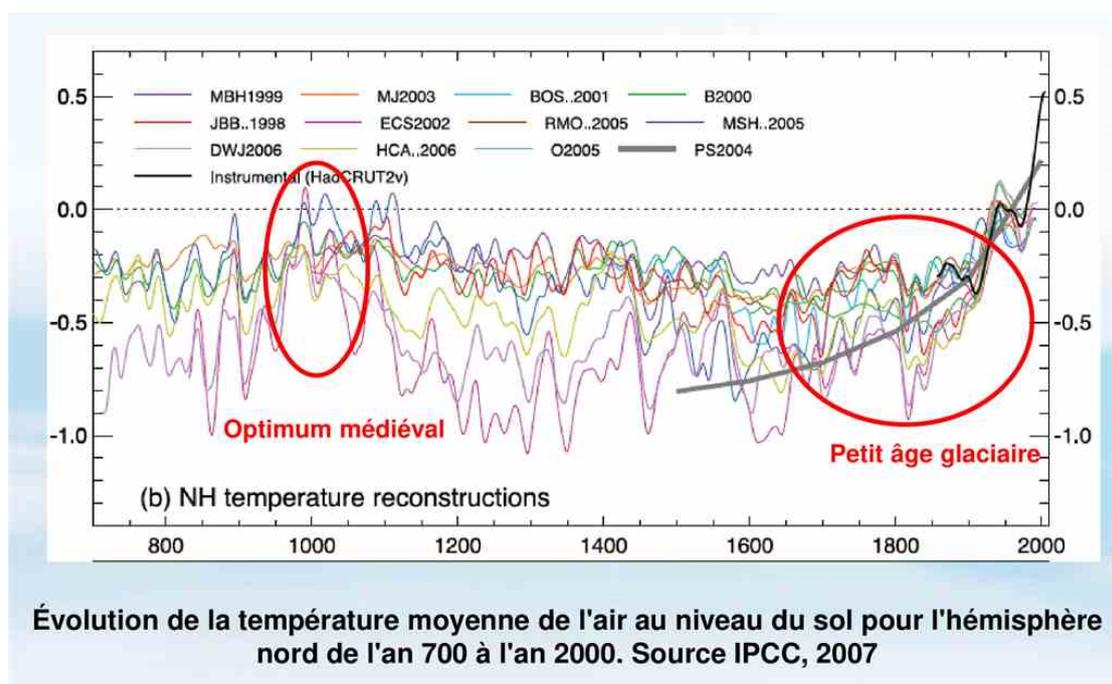
11. EXISTE-T-IL RÉELLEMENT UN HAUT DE FOURCHETTE ?

faire une moyenne de tout ça et considérer que c'est ça que vous allez retenir comme valeur pour la simulation multi-modèles. Ce qu'on appelle « multi-ensemble » en anglais.

En fait ce qu'il faut comprendre avec ces histoires de simulation – c'est une autre manière de dire exactement la même chose – c'est que quand on vous dit « pour tel scénario d'émissions, le réchauffement qu'on obtient derrière est de tant », en fait il faut comprendre que ce « tant » est la valeur la plus probable d'une distribution qui ressemble à une normale.

Donc ce n'est pas une façon de garantir que ça ne peut pas être plus. C'est clair ? Ce n'est pas une façon de garantir que ça ne peut pas être plus.

12. Quelques degrés en un siècle, pas une affaire courante...



Diapositive 13.

Ce qui est intéressant avec l'élévation de température que nous allons avoir – ou ce qui est indispensable plus exactement, pas seulement intéressant – c'est de confronter ça au passé. Pourquoi ?

Imaginons que je prenne un être vivant et que je vous dise : « Cet être vivant, je vais augmenter sa température de 4°C. » Et je vous demande : « Est-ce que c'est ennuyeux ou est-ce que ce n'est pas ennuyeux ? » Eh bien, je vais vous dire : ça dépend.

Si vous prenez un poisson rouge – ceux d'entre vous qui auront un jour des enfants, vos enfants réclameront peut-être un jour un poisson rouge. Et à ce moment-là, vous découvrirez que le poisson rouge, il a besoin d'être emmené en vacances, etc. Et donc vous êtes pressé que le poisson rouge meure parce que comme ça vous êtes débarrassé des emmerdements. Alors, vous avez tout essayé pour faire mourir le poisson rouge : de lui donner de l'eau un peu plus froide, un peu plus chaude, etc. Puis vous voyez que le poisson rouge se porte comme un charme, à votre grand désespoir. Pourquoi ça ? Parce que le poisson rouge est un animal à sang froid.

12. QUELQUES DEGRÉS EN UN SIÈCLE, PAS UNE AFFAIRE COURANTE...

Donc le poisson rouge, si vous lui infligez une élévation de 4 °C de l'eau dans laquelle il se promène, il s'en fout complètement. Donc il continue à être là, et bien là, et vous à devoir partir avec son aquarium. Si vous infligez à certains animaux une variation de leur température interne de 4 °C, ça leur fait – pardonnez moi l'expression – ni chaud ni froid, donc ce n'est vraiment pas grave.

Si je prends un animal à sang chaud, vous par exemple, et que je vous inflige une variation de votre température interne de 4 °C, il suffit que j'attende un peu et vous êtes mort. Donc, 4 °C en plus est-ce que c'est grave, docteur ?

Pour le système climatique, la réponse est exactement la même : ça dépend de la variation spontanée du système quand il est livré à lui-même. Si on réalise que le système livré à lui-même varie de 4 °C d'une semaine sur l'autre, ce n'est vraiment pas grave que l'action des Hommes provoque un réchauffement de 4 °C, puisque ça rentre dans la variabilité naturelle du système. Donc on s'en fiche complètement.

Par contre, si la variabilité naturelle du système n'est pas de 4 °C tous les quatre matins, à ce moment, ça devient très ennuyeux parce que ça veut dire qu'on inflige une déstabilisation qui est inédite, et donc il y aura des conséquences qui seront inédites.

Alors pour répondre à la question en ce qui concerne le système climatique, il faut être capable de reconstituer la manière dont il a varié dans le passé. Donc il y a toute une discipline, maintenant, de la science (qui s'appelle la paléoclimatologie) qui sert à ça. C'est-à-dire qui sert à reconstituer les variations de température du passé.

Il y a deux grandes familles de techniques pour faire ça. Ou trois grandes familles plus exactement. Et à chaque fois c'est la science du trou. Il faut commencer par faire des trous.

Une première manière de faire des trous, c'est de faire des trous dans les arbres, et si possible, dans les arbres très vieux. Et comme ça on va mesurer l'épaisseur et la dureté des cernes d'arbres, qui s'agrègent année après année dans le tronc. Alors est-ce que vous savez quel est l'âge du plus vieil arbre vivant aujourd'hui ? 2000, qui dit mieux ? 700, qui dit mieux ? 4000 ? Alors, c'est encore un peu plus que ça. C'est 7000.

Alors, ce sont des arbres qui vivent en général dans des zones qui sont extrêmement limitées pour la vie. Donc c'est comme la neige en Antarctique quoi : ce sont des trucs qui s'accroissent extrêmement peu tous les ans ; un métabolisme très, très ralenti. Et je crois que c'est un pin de Californie dans une zone

12. QUELQUES DEGRÉS EN UN SIÈCLE, PAS UNE AFFAIRE COURANTE...

semi-désertique. Donc, dans ce trou-là, on peut aller faire des trous et alors on a 7000 ans d'archives climatiques.

Alors le problème c'est qu'on n'a pas des archives globales. On a une archive climatique là où pousse l'arbre. Par ailleurs, l'arbre ne pousse pas en hiver. Donc cette archive climatique, qu'est-ce qu'elle vous donne ? Elle vous donne les températures... On est capable avec ça de reconstituer les températures et les précipitations de la saison de pousse, c'est-à-dire printemps et été. Mais de là, on a déjà un « proxy » pour voir comment évolue le système climatique dans son ensemble sur l'année. Les arbres, vous aurez remarqué comme moi qu'ils n'en poussent pas beaucoup sur l'eau.

Donc cette méthode-là, elle marche bien pour reconstituer les températures terrestres. Donc dès que vous avez accès à des arbres, ou à des troncs d'arbre fossilisés que vous êtes capable de dater correctement, alors vous avez accès à une technique qui s'appelle la dendrochronologie, qui vous permet de reconstituer les températures du passé. À nouveau, ces températures du passé se reconstituent avec une modélisation, qui permet de passer des données d'observation (l'épaisseur et la dureté des cernes d'arbres) à une température observée – ou à une température existante plus exactement.

Et vous avez les modèles qui permettent de faire ça avec un paramétrage propre. De telle sorte que chaque chercheur qui fait ce genre d'analyses publie ses propres résultats. Alors vous avez ici une compilation qui a été publiée dans le rapport du GIEC de 2007, dans laquelle vous avez tous les auteurs qui sont là, qui ont chacun publié une reconstitution des températures de l'hémisphère nord (parce que c'est le plus équipé en terres émergées sur le dernier millénaire).

Alors vous voyez, sur le dernier millénaire, qu'il y a deux points de convergence de ces analyses. La première est que tous disent qu'au moment de l'an 1000, à peu près, il a fait un peu plus chaud qu'au reste du millénaire. Alors ce « un peu plus chaud aux alentours de l'an 1000 » est connu sous le nom de « l'optimum médiéval ». Alors, il y a un truc qui vous intéresserait au moment de l'optimum médiéval, c'est qu'ils avaient du vin en Angleterre. Donc je pense que le vin, ça vous intéresse beaucoup.

Et dans les autres conséquences qu'on a eues à ce moment-là, les Vikings ont sorti leurs prospectus publicitaires et ont dit : « Allez donc au Groenland, c'est tout vert. » Et en fait, « Greenland », Groenland, alors qu'il fait tout froid, ça veut dire « terre verte ». Alors l'histoire, qui est une histoire qui est souvent enfourchée par les climato-sceptiques pour dire : « Regardez, le climat varie naturellement, il y a eu un moment où le Groenland était tout vert... » Évidemment

12. QUELQUES DEGRÉS EN UN SIÈCLE, PAS UNE AFFAIRE COURANTE...

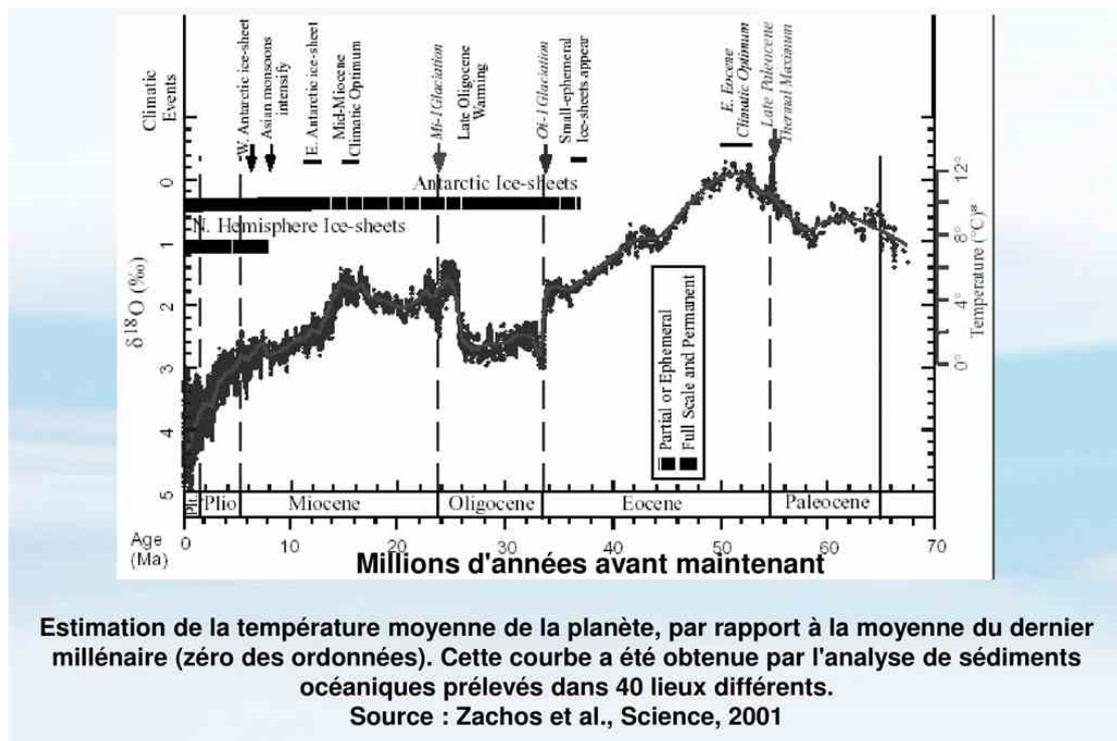
que le Groenland n'était pas tout vert. Il y a mille ans, il y avait la même calotte glaciaire qu'aujourd'hui sur le Groenland. Par contre, vous avez une frange du Groenland où vous n'avez pas de glace (c'est là qu'habitent quelques inuits, eskimos, etc.). Vous avez quelques bancs rocheux. Et sur ces endroits qui étaient dépourvus de glace, il y a mille ans comme aujourd'hui, la saison de pousse de l'herbe était un peu plus longue qu'aujourd'hui. Et donc on soupçonne les Vikings de s'être débarrassés de quelques personnes qu'ils n'avaient plus envie de voir, en les expédiant là-bas avec troupeaux, femmes et enfants.

Vous pouvez lire l'histoire dans le bouquin de Jared DIAMONDS qui s'appelle « Effondrement », « Collapse » en anglais. Alors, il y a un certain nombre de trucs qui sont discutables dans son bouquin, mais ça, par contre, c'est assez bien raconté. Je pense que c'est assez juste. Donc on a envoyé 5000 Vikings là-bas avec leurs troupeaux. Et puis au moment où le climat s'est refroidi après l'optimum médiéval, vous voyez là, eh bien la saison de pousse de l'herbe a diminué, les vaches sont mortes, et les Vikings avec. Parce qu'ils n'ont pas voulu se mettre à manger du phoque. Ils n'aimaient pas ça culturellement.

Donc les analyses convergent pour vous dire ça. Vous voyez qu'après, ça se refroidit. Là, on est à quelque chose qui s'appelle le petit âge glaciaire en Europe : les canaux de Bruges gèlent totalement l'hiver, on se pèle de froid, la Marquise de Sévigné allume du feu au mois d'août, enfin bref, c'est le baigne. Et c'est à ce moment-là qu'a lieu la Révolution française. Vous savez que la Révolution française est née après une grande famine qui a eu lieu en France, et a fait entre 500 000 et un million de morts. C'est une époque où les récoltes ne sont pas bonnes. Donc ça déclenche des troubles parce que les gens n'aiment pas avoir le ventre vide.

Ce que vous voyez également en troisième convergence de tous ces trucs-là, c'est qu'à partir du début de l'époque industrielle, crac !, toutes les analyses vous disent que ça se met à monter rapidement. Donc la première conclusion qu'on arrive à tirer de cette analyse-là, à l'échelle du millénaire, c'est qu'on est déjà ici dans un déplacement de température qui est totalement hors tendance, qui va beaucoup plus vite que toute tendance que vous pouvez dégager là-dessus. Je parle bien de tendance, je ne parle pas de variation annuelle mais de toute tendance que vous pouvez dégager là-dessus.

13. Quelques degrés en un million d'années, déjà plus



Diapositive 14.

Alors après, on peut remonter plus loin dans le temps – je vous montrerai après – mais on peut remonter là, sur ce graphique-là, jusqu'à 60 millions d'années. Alors si on regarde à 60 millions d'années, on voit que depuis cette époque, le climat – alors faites attention, l'instant présent est ici, l'instant passé est là – on voit que ce qui s'est passé, c'est globalement un lent refroidissement du système climatique. Et ce lent refroidissement du système climatique est notamment allé avec une diminution importante de la quantité de CO₂ dans l'atmosphère.

Donc, à des échelles de temps très, très longues, effectivement, le climat a plutôt eu tendance à se refroidir. Ce que vous voyez également, c'est que, il y a longtemps, le climat a pu être quasiment 10 °C plus chaud qu'aujourd'hui. Donc le fait que le climat soit plus chaud qu'aujourd'hui n'est pas nécessairement quelque chose qui est une première dans l'histoire planétaire.

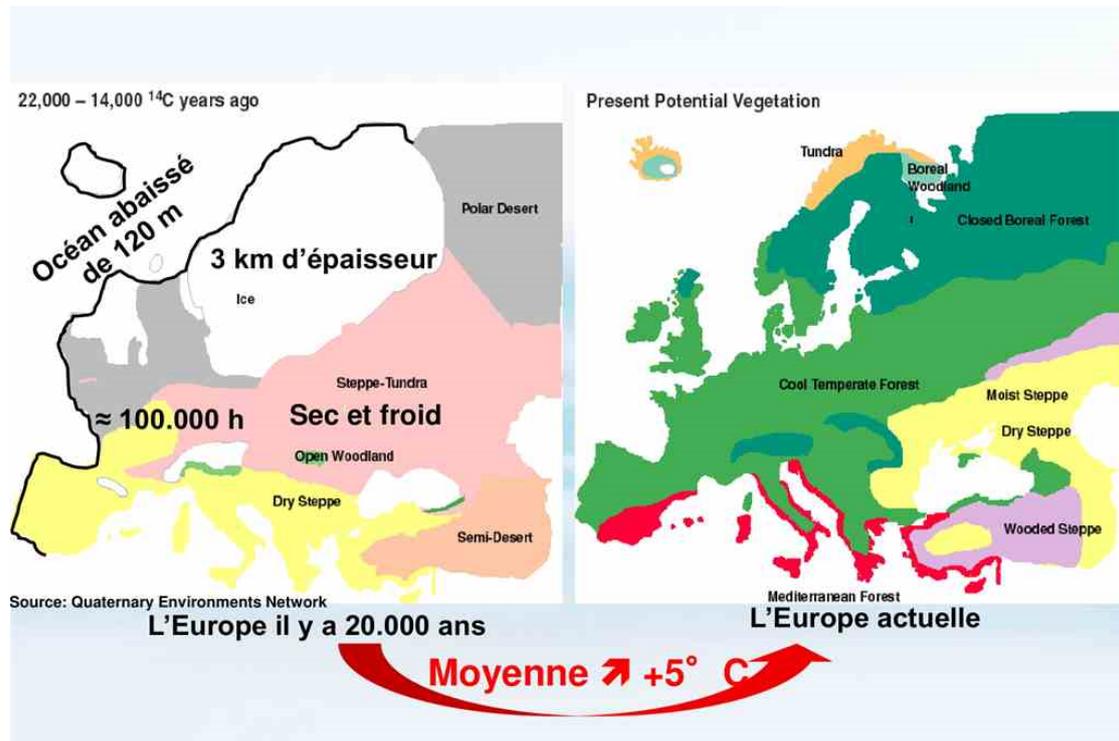
13. QUELQUES DEGRÉS EN UN MILLION D'ANNÉES, DÉJÀ PLUS

Par contre une première dans l'histoire planétaire – et c'est ça qu'on va détailler à partir de maintenant –, c'est une variation de cette ampleur appliquée à une humanité sédentaire de 7 milliards de bonshommes ou 10 milliards de bonshommes. Ça, c'est nouveau. Et s'il y a eu des variations de grande ampleur dans le passé, à aucun moment, en tout cas en ce qui nous concerne, elles n'ont empêché notre espèce de se développer (puisqu'on est là).

Par contre, entre ne pas porter atteinte à l'espèce et ne porter atteinte à aucun représentant de l'espèce, il y a une petite différence. Dit autrement, si le changement climatique en cours ne laisse que 5 millions de bonshommes survivants, c'est largement assez pour assurer la perpétuation de l'espèce. Ça ne pose pas de problème pour la perpétuation de l'espèce.

Donc là, le sujet qu'on va voir à partir de maintenant, ce n'est pas tant : « Est-ce que les Hommes vont passer à travers? ». Ça, je peux déjà vous donner la réponse : c'est oui. C'est : « Est-ce qu'on peut avoir une idée de : dans quelles conditions et combien d'entre eux? » Et ça, ce sont des questions qui restent des questions ouvertes.

14. 5 °C de plus en un siècle, juste un pull en moins ?



Diapositive 15.

Je vais introduire maintenant une variation de température plus récente que celle qui s'est passée il y a 65 millions d'années, avec cette petite carte. Enfin, deux cartes qui représentent l'Europe.

Vous avez ici une représentation schématique des écosystèmes – qui sont donc le reflet du système climatique, car le reflet du système climatique, c'est les écosystèmes installés. Les écosystèmes installés en Europe aujourd'hui, si on ne les supprime pas pour faire essentiellement des champs, des routes, des ponts, des voies de chemin de fer, des usines, et l'École des Mines... Donc si on ne supprime pas les écosystèmes pour faire tout ça, on a, en Europe, essentiellement des forêts. Ça veut dire que le climat est suffisamment humide pour qu'y poussent des grosses espèces végétales, et que, par ailleurs, il est ni trop froid ni trop chaud pour que le métabolisme de ces espèces ne soit pas gêné.

Voilà à quoi ressemble l'Europe il y a vingt mille ans. Alors, il y a vingt mille ans, dans les évolutions du Quaternaire, nous sommes au cœur de la dernière ère glaciaire. Donc il fait beaucoup plus froid qu'aujourd'hui, sinon on ne se-

14. 5 °C DE PLUS EN UN SIÈCLE, JUSTE UN PULL EN MOINS ?

rait pas en ère glaciaire. Après, vous allez voir de combien. Et comme il fait beaucoup plus froid qu'aujourd'hui, le paysage de la planète n'est pas du tout le même. Et le paysage de l'Europe n'est pas du tout le même.

La première chose que vous pouvez voir ici, c'est que vous oubliez Erasmus chez les Suédois puisqu'il n'y a pas de Suédois. Il n'y a pas de Danois. Il n'y a pas de Finlandais. Il n'y a même pas de Nord-Allemands. Et il n'y a pas d'Écossais (donc bonne nouvelle pour les joueurs de rugby). Tous ces braves gens sont sous la glace. Vous avez une énorme calotte de trois kilomètres d'épaisseur qui recouvre la totalité de la Scandinavie. Alors, pour ceux d'entre vous qui les aiment bien, il n'y a pas non plus de Québécois puisque la totalité du Canada est aussi sous la glace. Donc il n'y a pas de sables bitumineux : bonne nouvelle. Vous avez une énorme calotte de glace, encore plus grosse que celle qui est posée sur la Scandinavie, qui est posée sur le Canada.

Cette glace est constituée d'eau. Les jeunes ingénieurs que vous êtes savent ça. Et cette eau, il a bien fallu la prendre quelque part. Alors il n'y a manifestement pas assez d'eau, ni dans les lacs, ni dans les rivières, ni dans l'atmosphère pour faire autant de glace. Le seul endroit où vous pouvez prendre toute cette eau pour faire toute cette glace, c'est la mer. Et comme la mer est une grande baignoire dont le fond n'a pas varié, eh bien si vous prenez de l'eau pour faire toute cette glace, le niveau de l'eau baisse. Et le niveau de l'eau est plus bas de 120 mètres.

Donc il n'y a pas de course de l'EDHEC [École Des Hautes Études Commerciales du Nord] non plus, puisqu'il n'y a pas de Manche. Donc vous oubliez le sponsoring pour aller faire de la voile, vous pouvez enfin faire des problèmes sérieux. Le point bas de la Manche aujourd'hui est 114 mètres. Comme le niveau de l'eau est plus bas de 120 mètres, il n'y a plus de Manche.

Pour ceux d'entre vous qui en ont entendu parler, on peut rentrer dans la grotte Cosquer à pied sec. Je ne sais pas si vous savez où est la grotte Cosquer. La grotte Cosquer est une grotte dont l'entrée est aujourd'hui immergée, et qui se trouve en Méditerranée. C'est-à-dire qu'il faut descendre à 30 mètres sous le niveau de l'eau pour rentrer dans la grotte. Alors vous avez un boyau ascendant, et la grotte est préservée, elle. Et à l'intérieur vous avez des peintures, etc., comme à Lascaux. L'entrée de cette grotte est aujourd'hui immergée. Ça veut bien dire qu'à l'époque où elle était habitée, on pouvait y entrer à pied sec. Manifestement, les hommes préhistoriques n'avaient pas de scaphandre autonome. Donc ça veut dire que le niveau de l'eau était beaucoup plus bas.

Le climat était beaucoup plus froid, donc il y avait beaucoup moins d'évaporation, donc il était beaucoup plus sec. Et dans ce climat beaucoup plus froid et

14. 5 °C DE PLUS EN UN SIÈCLE, JUSTE UN PULL EN MOINS ?

beaucoup plus sec, la végétation installée en Europe ressemblait à ce que vous avez aujourd'hui au nord de la Sibérie.

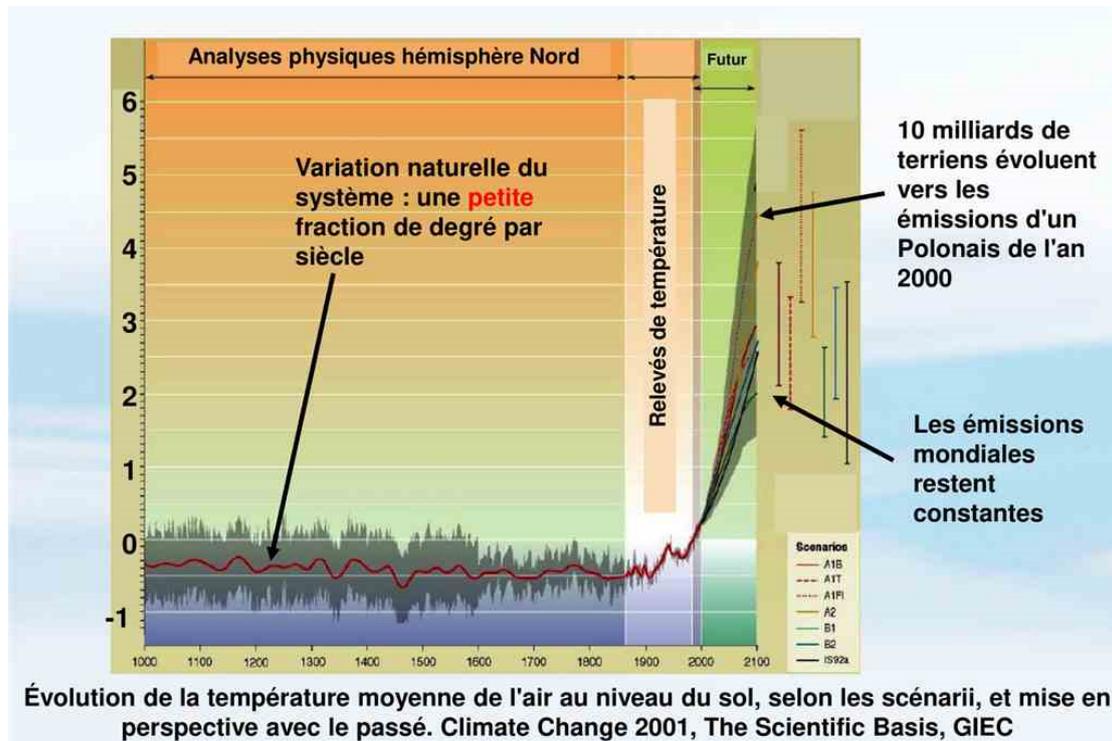
Donc ce n'est pas très gras, d'accord ? Les chatoyants champs de blé d'aujourd'hui et la chatoyante forêt de Fontainebleau ne sont pas vraiment là. Et dans ce genre d'écosystème, on arrive à faire vivre 100 000 bonshommes, c'est-à-dire 100 000 animaux en bout de chaîne alimentaire. C'est à peu près la population humaine à l'époque. Donc vous voyez, ce n'est même pas le nombre d'étudiants en classes-prépa je crois. Enfin en tout cas, ce n'est sûrement pas le nombre d'étudiants en grandes écoles tout court. Vous voyez que c'est un petit effectif la population française à cette époque.

Donc à gauche, l'Europe à l'ère glaciaire. À droite, l'Europe d'aujourd'hui. Je répète que quand on passe du paysage de gauche au paysage de droite, il y a un réchauffement climatique. On est d'accord ?

Eh bien, ce réchauffement, historiquement, c'est 5 °C en cinq à dix mille ans. C'est juste ça. Donc on a un précédent historique de quelques degrés de réchauffement en valeur absolue, et vous voyez le genre de choses que ça produit en ce qui concerne le paysage.

Donc une autre manière de dire ça, c'est que la variabilité naturelle du système n'est pas du tout à l'échelle de ce que nous sommes en train de déclencher aujourd'hui. Donc le beau parallèle n'est pas le poisson rouge qui va résister à tout, c'est bien vous qui ne résistez pas à une variation de quelques degrés de votre température interne, pourvu que je la prolonge suffisamment longtemps. C'est bien ça le bon parallèle.

15. Le problème est devant, pas derrière!



Diapositive 16.

Alors, si je mets en perspective maintenant ce qui s'est passé au dernier millénaire, ce qui s'est passé au dernier siècle, et ce qui pourrait se passer à l'avenir, voilà à quoi ça ressemble.

Ici vous avez la reconstitution – à partir de la dendochronologie, comme je le disais tout à l'heure – essentiellement de la température du siècle passé. Donc ça, c'est essentiellement fait avec des analyses. À partir de 1860 – je vais le commenter – vous avez une mesure directe de l'élévation de température de la planète. Question : pourquoi est-ce qu'on n'a pas fait ça avant 1860?

*** Réponse auditoire ***

Non. Beaucoup plus simple que ça.

*** Réponse auditoire ***

Et en particulier, avec quoi on mesure une température? Avec un thermomètre. De quand date l'invention du thermomètre?

15. LE PROBLÈME EST DEVANT, PAS DERRIÈRE!

*** Réponse auditoire ***

Non. 1492. Sauf qu'en 1492, vous avez 1 thermomètre. Est-ce que vous mesurez la température en tout point du globe avec 1 thermomètre? Non, c'est un peu compliqué. Donc il en faut beaucoup, beaucoup, beaucoup, des thermomètres, pour commencer à mesurer la température en tout point du globe.

Par ailleurs, de quoi est faite la surface terrestre en majorité? D'eau. Est-ce que vous avez beaucoup de villes et beaucoup de champs à la surface de l'océan? Non, pas beaucoup. Et est-ce que vous avez une grosse population, et donc beaucoup de thermomètres, à la surface de l'océan? Non. Vous avez quand même des thermomètres à la surface de l'océan. Où ça?

*** Réponse auditoire ***

Sur les bateaux, absolument. Depuis que vous avez des moteurs et des machines à vapeur, vous avez notamment des thermomètres en entrée de prise d'eau (pour mesurer la température de l'eau, parce que ça vous sert à régler les machines). Et même avant, il arrivait qu'on fasse des prélèvements, etc. Sauf que ces prélèvements ne sont faits que sur les routes commerciales. Parce que les bateaux se baladent pour transporter des marchandises. S'ils commencent à faire du tourisme, leurs patrons les engueulent.

Et donc, il faut attendre que vous ayez suffisamment de routes commerciales à la surface de la planète pour qu'on considère que les températures mesurées dans l'océan sont représentatives de la température de l'eau. Et donc, avoir suffisamment de thermomètres sur les terres émergées et suffisamment de thermomètres sur les bateaux qui se baladent pour considérer qu'on a quelque chose qui commence à ressembler à un échantillonnage représentatif, on considère qu'avant 1860, ce n'est pas le cas.

Donc à partir de 1860, on est capable de proposer une mesure instrumentale de la moyenne planétaire.

*** Question auditoire ***

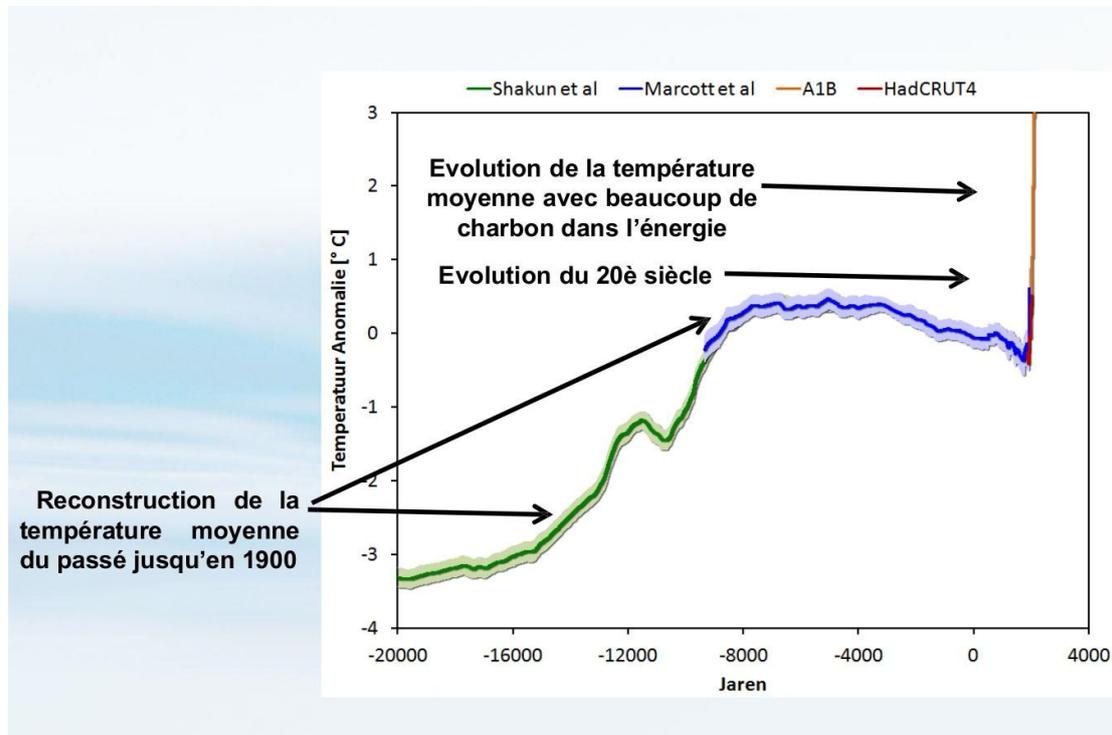
Non. Elle est représentative de la température de l'eau là où vous passez. Ce n'est pas le sillage du bateau, ce n'est pas la traînée du bateau qui va réchauffer l'eau au point que ça perturbe la mesure.

Et vous avez en perspective ici – je le répète – trois températures mesurées de manières différentes, et à des époques différentes. Donc, là : analyse. Là : instrumentale directement avec des thermomètres. Et là : modélisées. Donc là, il n'y a plus de thermomètre, on rentre dans la modélisation. C'est la modélisation de ce qui se passe plus tard.

15. LE PROBLÈME EST DEVANT, PAS DERRIÈRE!

Et ce que vous voyez sans l'ombre d'une discussion possible sur ce graphique, c'est que la variation de température à venir est quelque chose qui est sans commune mesure, quel que soit le scénario retenu, avec la variabilité naturelle du système. Donc même à 2 °C... C'est ça la conséquence – enfin, la conclusion – qu'il faut avoir en tête... Même à 2 °C, nous allons voir une quantité considérable de dysfonctionnements dans le système qui n'existaient pas jusqu'à maintenant. Même à 2 °C.

16. Et pour quelques degrés de plus...



Diapositive 17.

En fait, voilà la courbe qui vous donne la variation du système sur des échelles de temps depuis le dernier maximum glaciaire.

Donc ici, vous avez la reconstruction de la température du passé avec des analyses. Alors quand on est à l'échelle de la dizaine de milliers d'années, ce n'est plus les cernes d'arbres qu'on utilise : c'est la reconstruction avec les isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène dans les calottes glaciaires. C'est ça dont j'ai parlé la dernière fois.

Vous voyez ici que la température au début de l'Holocène était légèrement supérieure à ce qu'elle était après. Ça, c'est ce qu'on a déjà fait aujourd'hui. Et ça, à l'échelle, c'est ce qu'on pourrait faire dans le siècle qui vient.

Donc vous voyez que, manifestement, l'image du mur est assez bonne : une élévation de quelques degrés en un siècle ressemble plus au mur qu'à une promenade de santé. Ça va vraiment provoquer des dysfonctionnements majeurs un peu partout dans le système. On va rentrer un peu dans le détail après.

16. ET POUR QUELQUES DEGRÉS DE PLUS...

Quelque chose qui est important à garder en mémoire est que cette élévation de température, déjà en cours, et qui va s'accélérer, de temps en temps...

*** Question auditoire ***

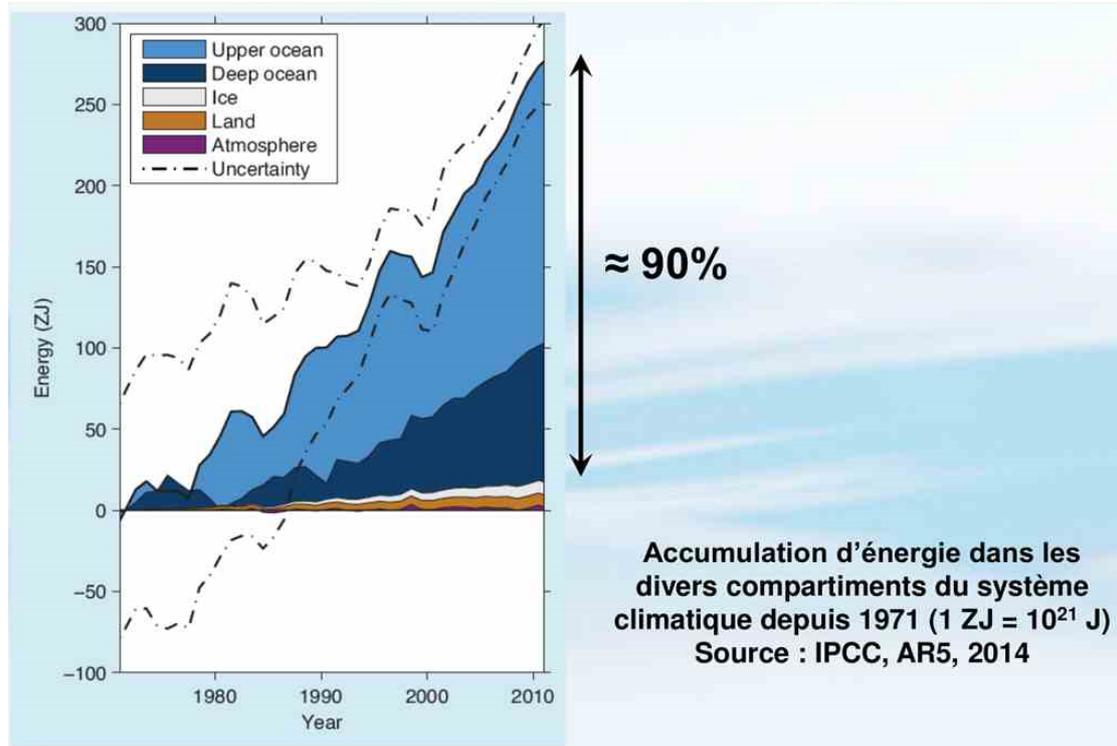
C'est 200 W m^{-2} . En l'occurrence le rayonnement solaire c'est plutôt 230 W m^{-2} . L'effet de serre c'est plutôt 170 W m^{-2} . Mais tout ça c'est de cet ordre de grandeur.

*** Question auditoire ***

$2,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Oui Madame, ça suffit. D'abord, c'est $2,5$ aujourd'hui. Je vous signale que ça augmente avec le temps. Et par exemple, on verra un peu plus tard ce qu'on appelle les RCP, « Representative Concentration Pathways ». En fait le nombre que vous avez derrière représente le forçage radiatif en 2100. Donc le RCP 4.5, c'est $4,5 \text{ W m}^{-2}$ en 2100.

Donc ils augmentent dans les simulations, c'est évident, avec le temps. Et par ailleurs, il faut voir qu'en ordre de grandeur – alors c'est vraiment un ordre de grandeur –, 1% d'augmentation de l'effet de serre, c'est un degré en plus. En gros. Donc 4% d'augmentation, c'est quatre degrés en gros. Je dis bien : en gros. Parce que le processus n'est pas du tout linéaire. Ce sont les ordres de grandeur.

17. Il paraît que le réchauffement s'est arrêté?



Diapositive 18.

Je disais donc que l'élévation de température au sol, de temps en temps, fait une petite pause.

Cette petite pause ne remet pas en cause ce qui se passe, tout simplement parce qu'il y a une petite illusion d'optique dans cette histoire. Beaucoup de gens considèrent que ce qui est représentatif de ce qui se passe en ce moment, c'est l'élévation de température de l'atmosphère. Alors en fait, l'élévation de température de l'atmosphère est la partie émergée de l'iceberg.

Parce que ce que vous montre ce diagramme, c'est où va le supplément d'énergie qui vient du supplément d'effet de serre. Et ce supplément d'énergie... Ce que vous voyez sur cette image, c'est que plus de 90% réchauffe non pas l'atmosphère, mais l'océan. L'océan – je vous l'avais déjà dit précédemment – pilote l'inertie du système à l'échelle de temps qui nous intéresse ici.

Or il suffit que le « switch » qui répartit l'énergie entre l'océan et l'atmosphère change un peu une année donnée... Par exemple, vous avez une circula-

17. IL PARAÎT QUE LE RÉCHAUFFEMENT S'EST ARRÊTÉ?

tion – la circulation qui enfouit la chaleur dans l'océan –, il suffit qu'elle soit un peu plus active, ou au contraire un peu plus faible, et à ce moment, vous allez avoir ou bien une accélération de la température de surface, ou au contraire un ralentissement de l'élévation, voire un léger refroidissement de la température de surface une année donnée.

La variabilité de la température atmosphérique dépend notamment de ce processus d'enfouissement de la chaleur dans l'océan. Qui peut connaître des petites variations à cause de petites variations de la circulation océanique. Ça ne fait absolument pas obstacle au fait que, globalement, le système emmagasine de plus en plus d'énergie. Mais si cette énergie est dans une couche intermédiaire de l'océan, par exemple, alors vous n'en voyez pas la traduction dans la température de surface.

**** Question auditoire ****

L'échange d'énergie, il se fait comment? On verra après. Il dépend de la circulation océanique à large échelle. Vous avez des processus convectifs dans l'océan, et quand l'eau qui était en surface passe en profondeur, elle emporte avec elle la chaleur. D'accord? Et elle est remplacée en surface par de l'eau un peu plus froide qui vient des profondeurs. Donc il suffit que ce mouvement s'accélère ou ralentisse un peu, et en gros vous avez un processus d'enfouissement de la chaleur de la surface vers les profondeurs qui s'accélère ou qui au contraire ralentit un peu. Et donc ça, c'est un élément qui pilote la température de surface.

18. Quelles seront les impacts du changement climatique?

Avec une amplitude qui dépendra de nos émissions :

Impacts sur les écosystèmes (affaiblissements, disparitions, déplacements)

Augmentation du niveau des océans

Impacts sur les courants marins et donc sur les climats régionaux

Modification des phénomènes extrêmes (dont pics de chaleur, précipitations intenses, sécheresses, etc)

Augmentation du « trou d'ozone »

Impacts directs sur la santé humaine (déplacement des zones endémiques pour les maladies, conséquences des phénomènes brusques, etc).

Et encore acidification de l'océan, risques géopolitiques, etc...

Et nous ne ferons jamais le tour de toutes les mauvaises surprises possibles à l'avance, puisque la situation est inédite

Diapositive 19.

On va maintenant commencer à regarder les impacts un peu plus détaillés. Il y a deux trucs à avoir en tête.

L'ampleur des impacts dépend de l'ampleur des émissions. Donc tout ce que je vais vous raconter à partir de maintenant est qualitatif (semi-quantifié pour un certain nombre de conséquences). Il y a des gens qui on fait tourner des modèles, en disant : « Si les émissions sont plus élevées, tel impact on est capable de le mettre dans telle fourchette, alors que si les émissions sont plus faibles, tel impact on le mettrait plutôt dans telle fourchette. Mais ça va dépendre. »

Et surtout, le point essentiel, c'est la dernière phrase. C'est-à-dire que ce que je vous montre à partir de maintenant est illustratif, ce sont des choses sur lesquelles on a déjà des indications. Il y a plein d'éléments sur lesquels on va apprendre en marchant. C'est-à-dire qu'on se rendra compte une fois que c'est trop tard. Qu'il y a tel truc, tel coup qu'on n'avait pas vu venir, qui est en train de se mettre en route.

18. QUELLES SERONT LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE?

Et ça, il va y en avoir de plus en plus, donc il va falloir vivre avec. Il va y en avoir de plus en plus parce que le système est beaucoup trop complexe, trop chaotique, et trop fortement non linéaire pour qu'on soit capable d'identifier risque par risque, géographie par géographie, et date par date ce qui pourrait se passer. Ça restera à jamais impossible.

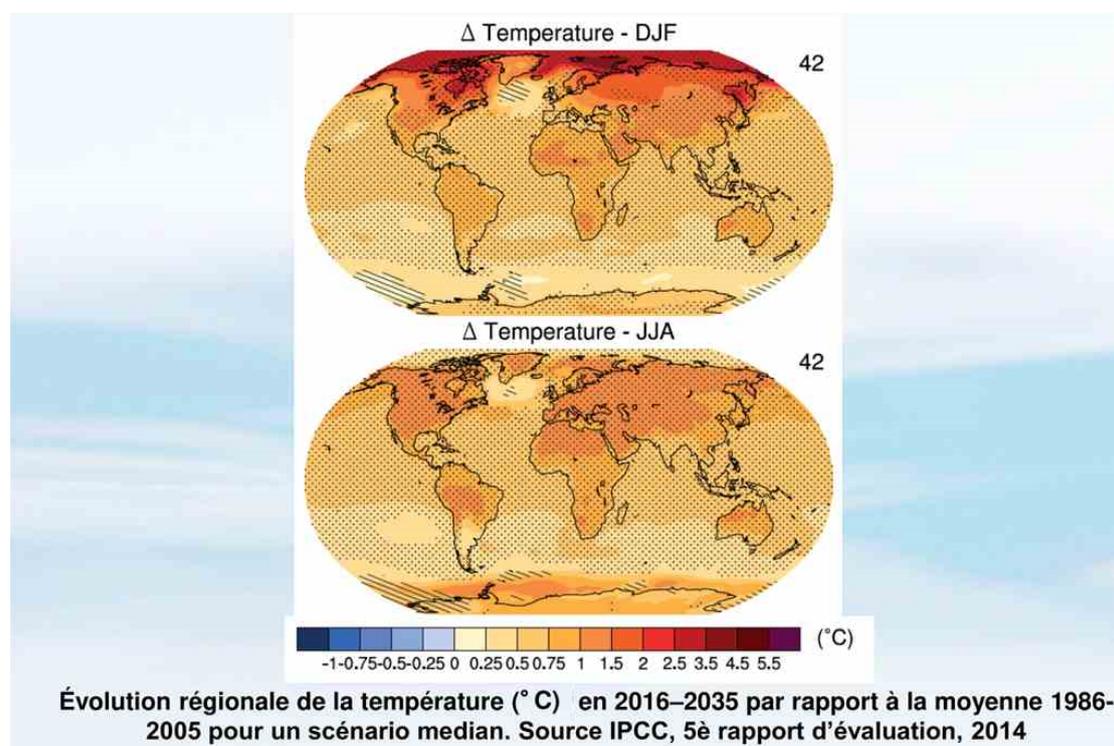
Alors une blague que je fais souvent, c'est : « Vous voyez, il y a une expérience qu'on a faite trois milliards de fois ou quatre milliards de fois ou cinq milliards de fois chez les Hommes : ça s'appelle se marier. Et pour autant, un couple qui se marie aujourd'hui, vous n'êtes pas fichu de savoir où il en sera dans trente ans. »

Alors imaginez bien qu'une expérience qu'on fait pour la première fois et qui est aussi complexe que celle-là, il est totalement illusoire de prétendre dire à l'avance la totalité des conséquences que ça aura dans quelques dizaines d'années. Donc on peut avoir une idée, exactement comme le couple. Je sais que dans trente ans, je ne sais pas si mes conjoints seront toujours mariés ou pas, mais ils auront toujours deux bras et deux jambes (sauf si on leur en a coupé un parce qu'ils ont eu un accident). Mais ils en n'auront pas quatre par exemple. Ils ne feront pas trois mètres de haut.

Voilà il y a un certain nombre de trucs qu'on est toujours capable de dire et puis il y a des trucs qu'on n'est absolument pas capable de dire. Je sais pas s'ils auront 2, 3, 0 ou 5 enfants et s'ils seront toujours ensemble. Et s'ils habiteront ici ou là.

Donc, pour le climat c'est exactement pareil, ou plus exactement c'est pire, puisque encore une fois c'est une expérience qu'on fait pour la première fois, et des expériences qu'on fait pour la première fois, c'est très, très rare que ça donne exactement des résultats qu'on est capable de prédire à l'avance partout et tout le temps.

19. Chauffe (un peu) Marcel



Diapositive 20.

Une fois que j'ai dit ça, il y a un certain nombre de constantes dans cette affaire.

La première, c'est que le réchauffement aura une structure spatiale qui est déjà à peu près connue. Là vous voyez la température. Là en l'occurrence vous l'avez en juin, juillet et août. Et ici en décembre, janvier, février. Vous voyez que, quelle que soit la saison, l'élévation de température est plus marquée sur les terres émergées qu'elle ne l'est sur les océans. Parce que les océans ont plus d'inertie thermique.

La deuxième chose que vous voyez, c'est que l'élévation de température est proportionnellement plus marquée l'hiver dans les hautes latitudes nord que l'été dans les hautes latitudes nord. Dit autrement, l'élévation de température ira plus vite l'hiver que l'été. C'est ce que je vous avais déjà dit la dernière fois.

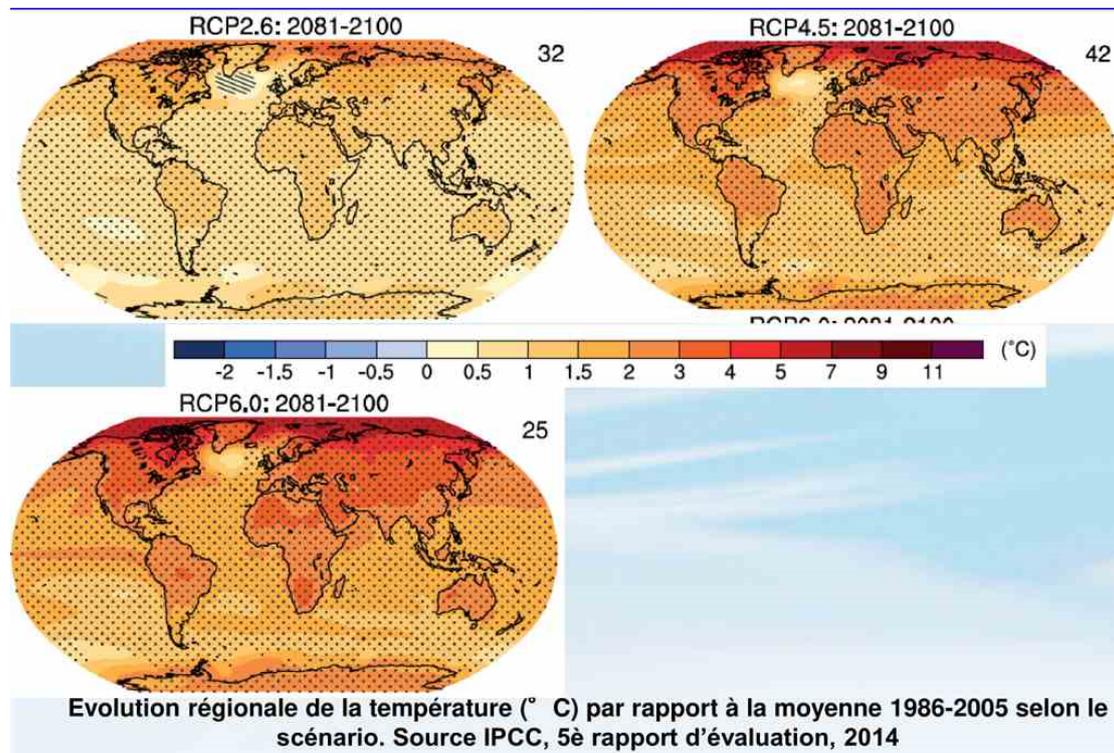
Ce que vous voyez également, c'est que dans tous les cas de figure, il y a un endroit – j'y reviendrai tout à l'heure, je vous expliquerai pourquoi – où l'élé-

19. CHAUFFE (UN PEU) MARCEL

vation de température est moins marquée qu'ailleurs dans l'hémisphère nord. C'est au sud immédiat du Groenland. Vous remarquez que c'est présent que ce soit l'été ou l'hiver.

Donc la première des conséquences que vous voyez ici, c'est que s'il y a un endroit où ça va particulièrement chauffer, c'est en région Arctique. Et pour ceux d'entre vous qui suivent un peu l'actualité, vous avez peut-être déjà remarqué qu'en région Arctique, il y a de temps en temps des températures totalement hallucinantes – le mot n'est pas trop fort – en hiver. Je crois que c'était le 1^{er} janvier 2018 – si ma mémoire est bonne – que la température au pôle nord était positive. Je dis bien : positive. Au-dessus de zéro.

20. Chauffe (un peu plus) Marcel



Diapositive 21.

La deuxième chose, c'est que – comme je vous le disais tout à l'heure – l'élévation de température va dépendre du scénario d'émissions.

Alors ici, vous voyez apparaître le sigle là : RCP. Donc je le redis, « Representative Concentration Pathway ». Donc le 2.6 est un scénario dans lequel le forçage radiatif en 2100 est de $2,6 \text{ W m}^{-2}$, ce qui est à peu près celui qu'on a aujourd'hui. Le 4.5 c'est qu'on a 4,5 et 6, c'est qu'on a 6 W m^{-2} .

Je vous ai enlevé ici, à dessein, le plus élevé des quatre scénarios RCP utilisés aujourd'hui, qui s'appelle le 8.5. Alors je vous l'ai enlevé – c'est une manipulation que j'assume – parce que ce scénario à RCP très élevé correspond à des émissions très élevées, c'est-à-dire une situation qui, pour moi, est totalement virtuelle. Dans laquelle l'humanité se porterait de mieux en mieux; il y aurait de plus en plus d'hommes avec une économie de plus en plus importante. Alors même que le changement climatique est au maximum des conséquences possibles, et que la moitié de la planète meurt de faim. Donc c'est un peu compliqué pour moi de rabouter les deux, donc j'ai considéré que celui-là je vous en parlerai peu.

20. CHAUFFE (UN PEU PLUS) MARCEL

De temps en temps vous le verrez quand même, mais je vous en parlerai peu. Parce qu'il a une incohérence interne – qui n'est pas liée aux physiciens, j'insiste – qui est liée au fait que les scénarios sont faits par des économistes qui n'ont pas les limites physiques. Par construction. C'est ce que je vous ai expliqué au premier cours. À partir du moment où l'économie ne dépend pas de facteurs limitants qui viennent de la physique, il n'y a pas de raison qu'on s'empêche d'avoir une économie qui est extrêmement importante avec une physique très limitée. Ça ne pose aucun problème chez eux. Moi, ça me pose un problème.

*** Question auditoire ***

Non, non, pas du tout. C'est uniquement la dynamique interne du modèle. C'est le fait que vous avez entre les modèles, encore une fois, des hypothèses. Alors, je vais vous donner un exemple qui est très connu : la paramétrisation des nuages. Je vous ai dit tout à l'heure que le modèle standard avait une maille qui faisait 50 à 100 km de côté. Pour tous ceux d'entre vous qui ont rêvassé un jour, l'été, couchés dans l'herbe, en observant les nuages, vous aurez remarqué que les nuages ne font pas cent kilomètres de côté. Il n'y a pas beaucoup de nuages qui vont d'ici jusqu'à Chartres et que vous pouvez voir d'un seul tenant, soit dit en passant. Ou alors, ça s'appelle une couverture de stratus, et c'est déprimant et c'est l'hiver.

Donc le nuage est un phénomène sous la maille. Pour tenir compte de la couverture nuageuse dans les modèles, vous êtes obligé de paramétrer cette couverture. Dit autrement, votre modèle va vous simuler la circulation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, et en fonction de la vapeur d'eau que vous avez dans la maille – enfin dans votre boîte à chaussures –, vous allez paramétrer (et ce n'est pas un truc dynamique, c'est un truc paramétré) la quantité de nuages que vous avez dans cette maille. En fonction des techniques qui sont utilisées par les différents modélisateurs pour faire cette paramétrisation, la quantité de nuages que vous avez, pour une même concentration en vapeur d'eau, et le fait que ces nuages soient des nuages de basse altitude ou des nuages de haute altitude – qui n'ont pas le même impact sur le climat –, ça va varier d'un modèle à l'autre.

Or rien que cette paramétrisation-là explique l'essentiel de la dispersion des résultats entre modèles. Le gros de la dispersion des résultats entre modèles est la façon dont les modèles approchent la représentation des nuages. Donc, voilà un exemple qui est en fait l'exemple le plus emblématique. Ça n'a absolument rien à voir avec la rétroaction du climat sur l'économie, puisque je vous ai dit que celle-là n'est pas prise en compte. Par construction. Dans aucune simulation.

20. CHAUFFE (UN PEU PLUS) MARCEL

Donc, ce que je disais, c'est qu'en fonction du scénario de l'intensification de l'effet de serre, vous avez des réchauffements qui sont plus ou moins marqués. Mais vous retrouvez à chaque fois ces constantes. C'est-à-dire que ça se réchauffe proportionnellement plus sur les continents que sur les océans, plus sur l'hémisphère nord que sur l'hémisphère sud, et que vous avez toujours cette singularité-là au sud du Groenland.

*** Question auditoire ***

C'est l'augmentation du forçage radiatif. C'est l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (donc du forçage radiatif).

*** Question auditoire ***

Alors, c'est le nom du scénario. Et la valeur que vous avez derrière « RCP » vous donne le forçage radiatif en 2100. Alors cela étant, pour une même valeur de RCP en 2100, vous pouvez avoir plusieurs trajectoires. Donc c'est 1 trajectoire. J'aurais pu vous en montrer plusieurs, mais là c'est 1 trajectoire. Je préfère rester sur mon histoire de scénarios d'émissions parce que ça se recoupe à peu près, et le scénario d'émissions est un truc qu'on visualise beaucoup plus facilement, car c'est la quantité qu'on émet.

*** Question auditoire ***

La variabilité, c'est-à-dire ? Des modèles ?

*** Réponse auditoire ***

Ah, le forçage n'est pas variable là. Le 2.6, c'est une trajectoire définie de forçage. Par contre, le fait d'avoir vingt modèles vous donne une dispersion des résultats. Parce que vous avez un résultat par modèle. Mais pour un même scénario RCP. Après, les mêmes modèles vous pouvez les utiliser avec un RCP 2.6, avec un RCP 4.5, etc. Et à ce moment, évidemment, ils ne vous donnent pas les mêmes résultats.

*** Question auditoire ***

Non, non, non. Il est par rapport à l'époque pré-industrielle. C'est-à-dire, c'est 2,6 dû à l'Homme. Et effectivement, la référence pré-industrielle due à l'homme, c'est zéro.

*** Question auditoire ***

Alors là, si quelqu'un est capable de me faire une prévision fiable de où seront les migrants dans ce genre d'évolution, je lui paye des cerises (je ne prends pas de risques, ça commence à être la saison). Ça fait typiquement partie des conséquences de bout de chaîne, qui sont imprévisibles.

Ce que vous pouvez arriver à prévoir, ce sont les facteurs de pression qui vont occasionner ce genre de choses. Mais après, moi je ne sais pas vous dire si

20. CHAUFFE (UN PEU PLUS) MARCEL

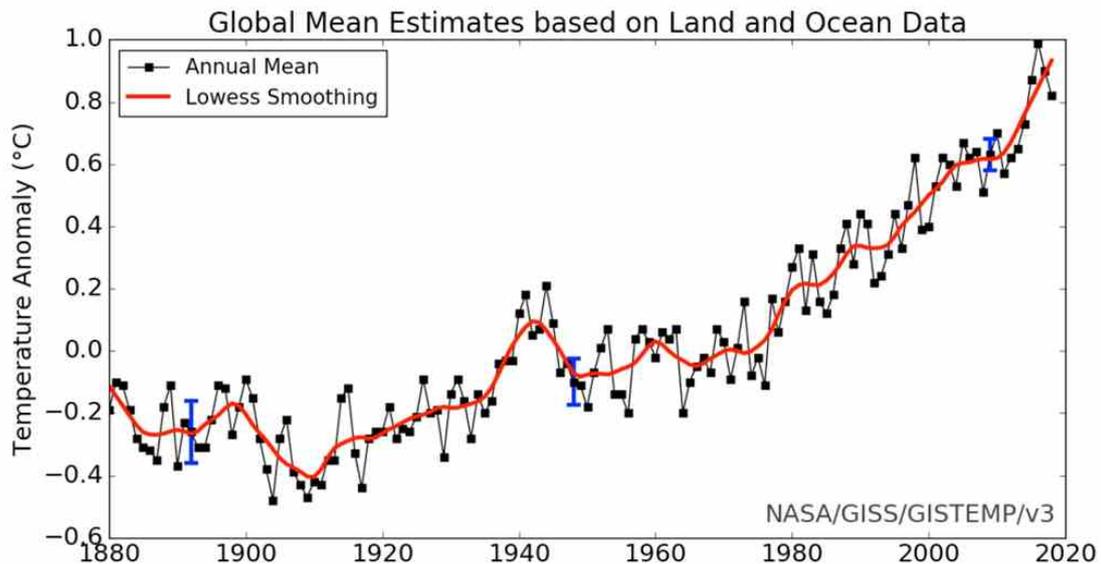
les gens vont d'abord migrer ou d'abord mourir à cause d'une épidémie. Donc s'il y a des épidémies, ils ne migreront pas puisqu'ils seront morts. Donc je ne sais pas.

La réponse à cette question, j'y viendrai tout à fait en fin d'exposé sur les conséquences. Parce que c'est le truc qui vient en premier à l'esprit du journaliste, mais c'est le truc qui vient en dernier à l'esprit du scientifique – quand ça lui vient à l'esprit. Parce que justement, c'est très difficile d'être prédictif sur ce genre de trucs.

Il faut bien voir que, plus on s'éloigne de la physique, et plus on rentre dans des choses qui nous touchent nous. Parce que nous, encore une fois, on ne vit pas dans un monde de températures. On vit dans un monde d'Hommes. Qu'il y ait des choses à manger ou pas, des animaux ou pas, que les voisins effectivement déboulent chez nous ou pas : c'est dans ce monde-là qu'on vit. Le physicien, lui, vit dans un monde de paramètres physiques. Donc il a envie de rester dans son monde et de ne pas trop s'aventurer dans des choses qui sont...

À chaque fois qu'on s'aventure dans des conséquences qui sont plus proches de nous, on rajoute une couche de complexité au raisonnement. Donc une couche d'incertitude. Donc ça ne veut pas dire que le risque n'est pas là. Ça veut juste dire que c'est plus difficile de le formaliser. J'y reviendrai après.

21. Notre affaire a déjà commencé?



Ecart entre la température annuelle moyenne et la moyenne 1951-1980 (0 des ordonnées). La barre bleue représente l'incertitude. Source : GISS/NASA, 2019

Diapositive 22.

Alors, je vous ai dit : depuis 1860, on a des données d'observation sur la variation de la température. Ici, en voilà une traduction. En l'occurrence c'est depuis 1880 mais peu importe.

Vous voyez que, depuis les Trente Glorieuses, il y a un accroissement très caractérisé de la température.

Et même avant, sur cette période-là, où la température est transitoirement redescendue, une des hypothèses qui tient la corde, c'est que cette phase-là – qui a correspondu au début des Trente Glorieuses, et donc au début de l'industrialisation accélérée de l'humanité – est également allée de pair avec une grande émission de dioxyde de soufre dans l'atmosphère. Parce qu'on utilisait beaucoup de pétrole – de plus en plus de pétrole et de charbon – qui sont des combustibles soufrés.

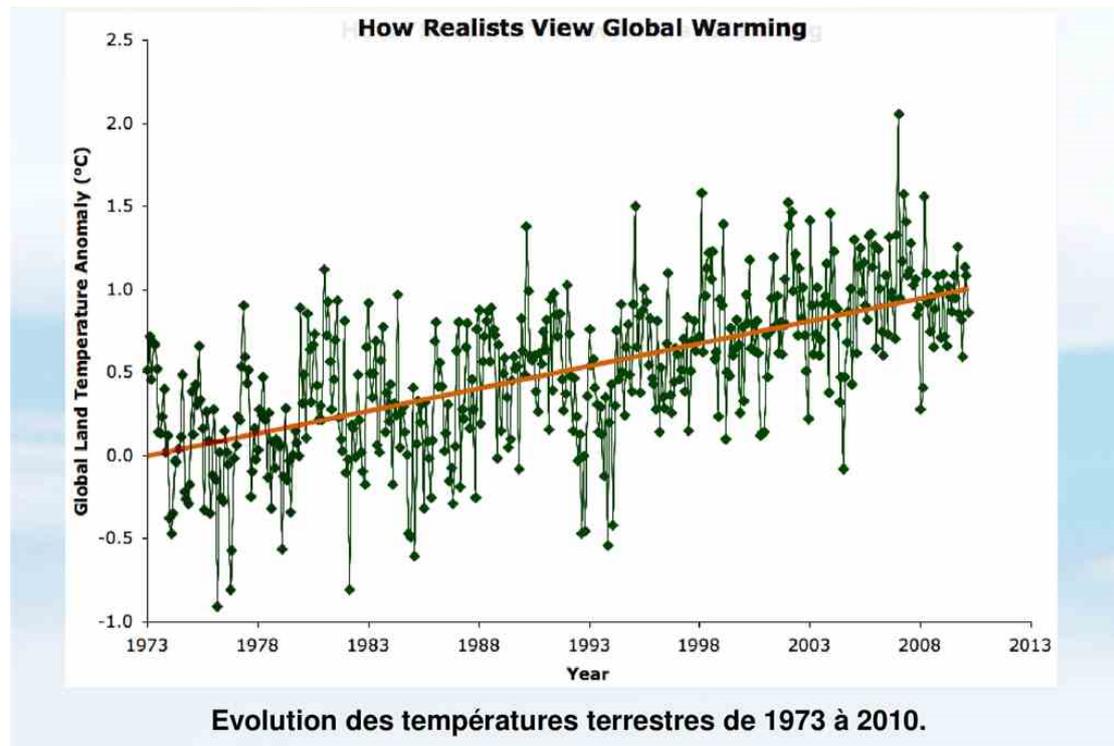
Et il n'y avait pas encore les mesures antipollution qu'il y a aujourd'hui. On n'épurait pas le dioxyde de soufre des fumées. Donc on a collé plein de sulfates

21. NOTRE AFFAIRE A DÉJÀ COMMENCÉ?

dans l'atmosphère, et donc on a un peu refroidi le climat à cause de ça. C'est une des explications qui tient la corde. Parce que vous remarquez que si vous partez d'ici, il y a la même tendance avec un pic là, qui se prolonge derrière. Puis après vous avez une accélération.

Ce que vous voyez également, c'est que là-dessus, la tendance est très claire.

22. Attention aux manipulations statistiques...



Diapositive 23.

Alors ça n'empêche pas un certain nombre de gens, même encore aujourd'hui, de prendre la série courte qui les arrange, en disant : « Regardez ! La température baisse. Ça s'est arrêté de monter puisque la température baisse. » Évidemment, il faut regarder la série longue. Donc il faut appliquer le bon filtre. Il ne faut pas regarder les séries courtes.

Vous allez me dire, des climato-sceptiques il y en a de moins en moins. Ce n'est pas complètement sûr. Ça dépend énormément du pays où on est. Et il se trouve qu'il y a un pays qui n'est maintenant plus le premier, mais le deuxième émetteur de gaz à effet de serre au monde, qui a une toute petite influence sur le reste des pays occidentaux (parce qu'il détient pour le moment la monnaie de réserve par excellence, qui s'appelle le dollar), et ce pays possède la plus forte proportion de climato-sceptiques au monde après l'Arabie Saoudite.

*** Question auditoire ***

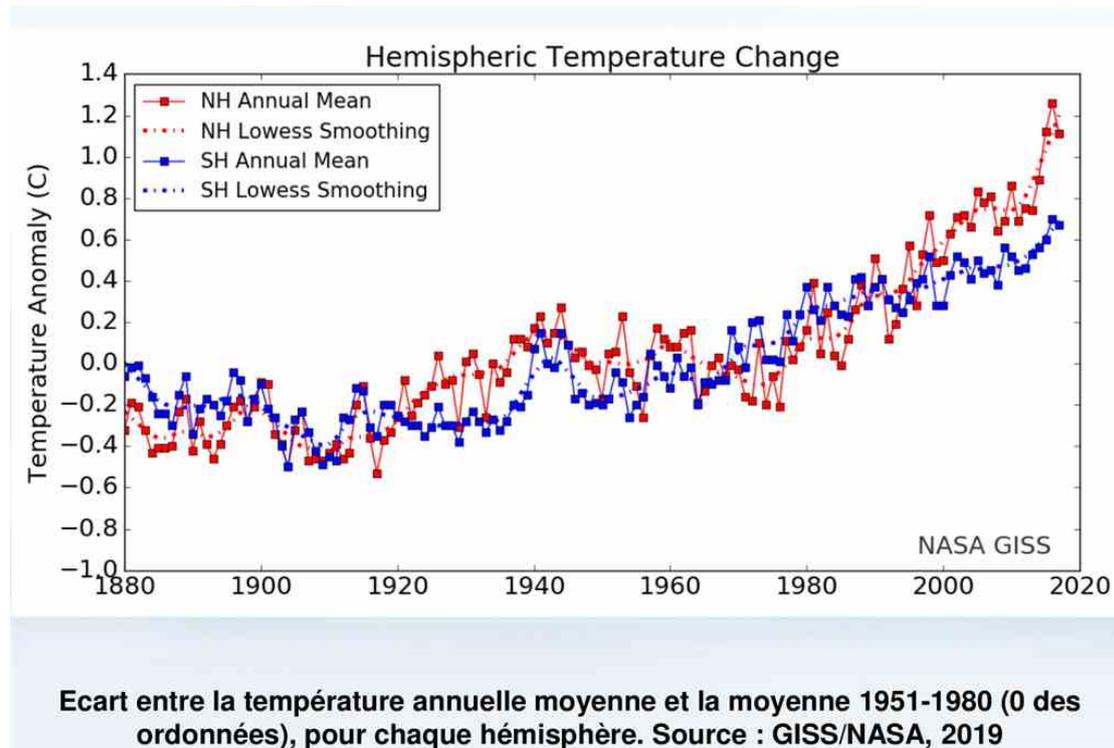
C'est à peu près 20%. Et des gens qui le sont durement. Et avec la même mesure, en France, c'est 6%. Non, pas 20. C'est 15. Mais avec la même mesure, la France c'est 6. Donc c'est en gros deux fois plus que la France.

22. ATTENTION AUX MANIPULATIONS STATISTIQUES...

C'est très différencié, après, en fonction de la région géographique. Mais cette petite animation, encore une fois, est là pour rappeler que c'est très facile de manipuler des statistiques pour leur faire dire ce qu'elles ne disent pas. Et là, vous avez un exemple particulièrement classique de ce genre de manipulation.

Il n'y a pas que la température globale qu'on peut analyser avec les relevés de température.

23. Notre affaire a déjà commencé ?



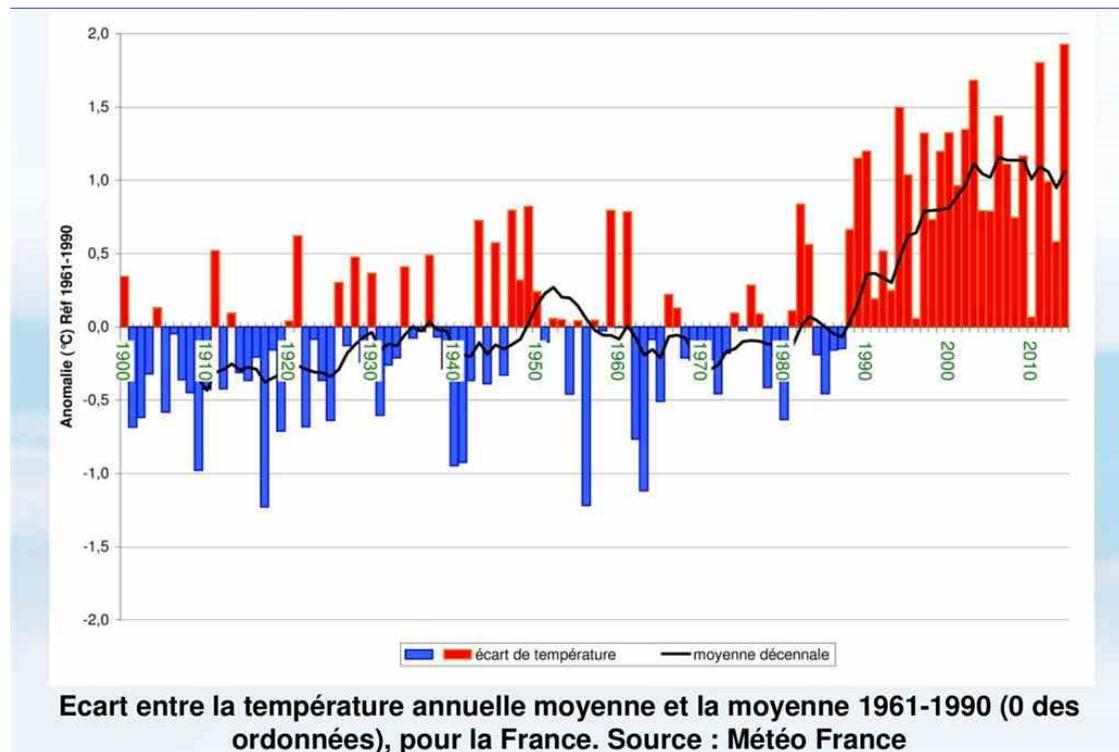
Diapositive 24.

Alors ici, vous avez une évolution de la température hémisphérique. Et vous voyez, par exemple, que les variations de température de l'hémisphère sud sont globalement un peu moins heurtées et un peu moins rapides, désormais, que les variations de l'hémisphère nord. C'est la conséquence de ce que je vous disais tout à l'heure : plus de continents sur l'hémisphère nord et une évolution plus rapide en Arctique.

Ici, vous avez également des moyennes différenciées entre les continents et l'océan. Donc on retrouve la conclusion de ce que je vous disais tout à l'heure : au-dessus des continents vous voyez cette baisse probablement due à l'industrialisation croissante.

Là, vous voyez que maintenant ça évolue plus lentement qu'au-dessus des continents, ce qui est tout à fait normal avec les différences d'inertie thermique.

24. Notre affaire a déjà commencé ?



Diapositive 25.

Ici, vous avez la courbe pour la France. Donc vous voyez que la France aujourd'hui a des anomalies de température, par rapport à la moyenne 1961-1990, qui sont désormais toutes positives. Et qui, en tendance, augmentent.

Ce qui fait que, par exemple, toute votre vie durant, vous verrez dans le journal, tant qu'il y aura des journaux à intervalles réguliers : « On vient de battre le record de température. » Ben oui. Puis on va les battre, et puis encore, et puis encore, et puis encore, et encore... Tant qu'il y aura des gens pour mesurer la température, et des journaux pour imprimer des trucs sur la température, on va battre périodiquement des records de température.

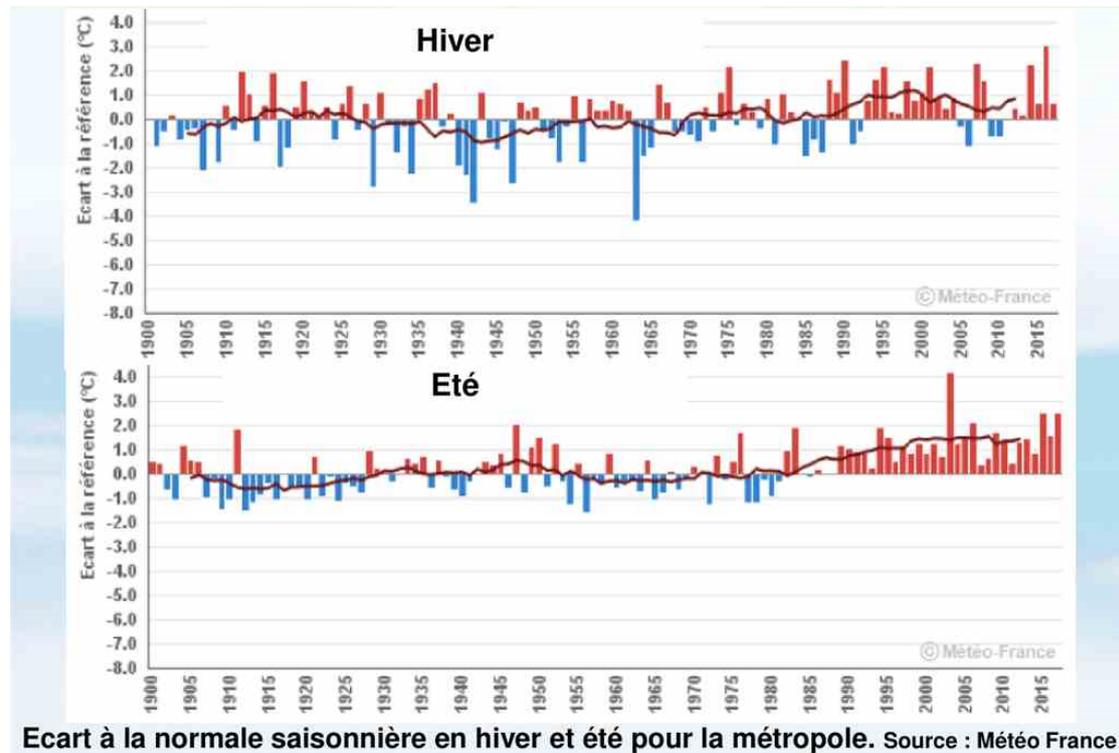
*** Question auditoire ***

Ben on s'en fiche. On prend n'importe quelle référence. Pour caractériser une variation, vous mettez le zéro des ordonnées où vous voulez. Et là, en l'occurrence, la moyenne n'est pas centenaire : elle est trentenaire.

24. NOTRE AFFAIRE A DÉJÀ COMMENCÉ?

Alors par contre, ce qui est sûr, c'est que, en ce qui concerne le climat, on a tendance à considérer que la série minimale pour regarder ce qui se passe quelque part, c'est trente ans.

25. Notre affaire a déjà commencé ?



Diapositive 26.

Ici, vous avez une variation des températures hivernales et estivales en France, là aussi, depuis un siècle.

Alors vous voyez – et ça c’est un truc qui est intéressant à garder en tête, notamment pour le dimensionnement du système électrique – que la variation de température en ce qui concerne l’hiver, qui est la même que en ce qui concerne l’été – c’est-à-dire ça augmente dans tous les cas de figure –, n’éclipse pas une variabilité annuelle qui a tendance à être plus importante que en ce qui concerne l’été.

Ici, vous avez un point qui est extrêmement singulier, vous voyez. Mais sinon, les anomalies de températures se ressemblent quand même beaucoup d’une année sur l’autre.

Alors que là, les anomalies de température, d’une année sur l’autre, elles peuvent varier de façon beaucoup plus importante. Donc, ce que vous dit ce graphique en particulier, c’est que le réchauffement climatique dans son en-

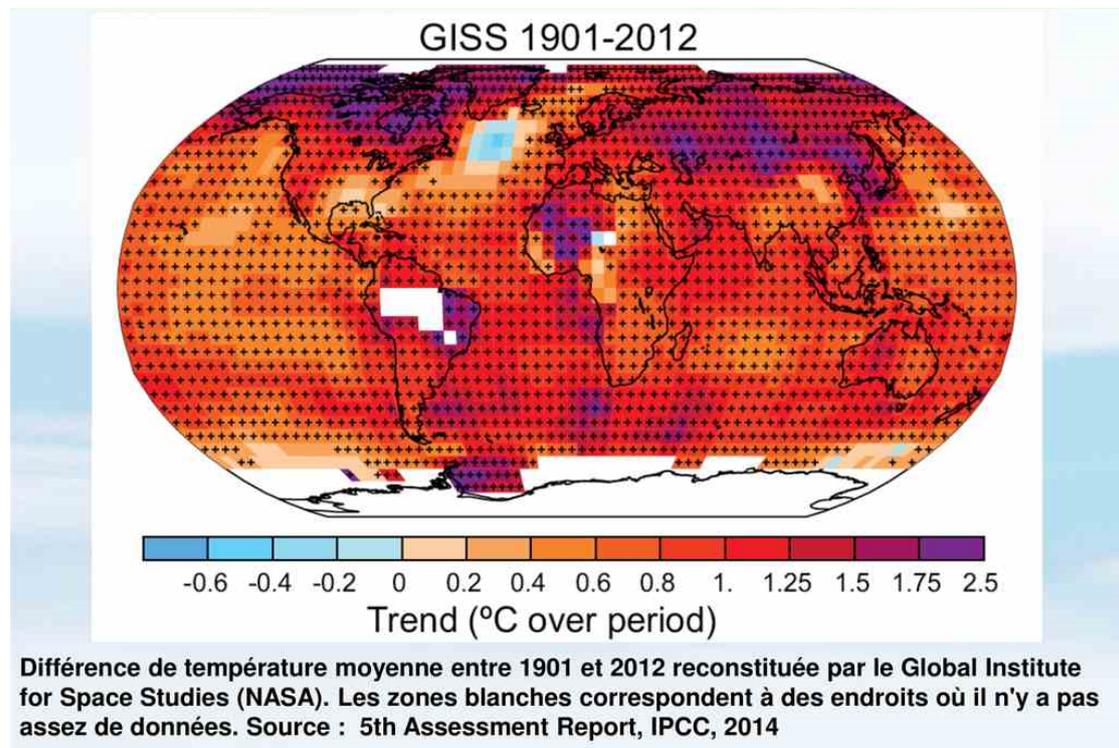
25. *NOTRE AFFAIRE A DÉJÀ COMMENCÉ?*

semble n'empêche pas, aujourd'hui, la survenue, de temps en temps, d'hivers qui peuvent rester plus froids que la moyenne. C'est évidemment de moins en moins fréquent mais ça ne l'empêche pas. Vous avez maintenant...

*** Question auditoire ***

La normale saisonnière, c'est toujours pareil, c'est la moyenne sur 30 ans, 1961-1990. Mais encore une fois, c'est juste une affaire de déplacement de l'origine.

26. Un changement déjà décelable ?



Diapositive 27.

Une des manières de savoir si ce qui a déjà eu lieu comme réchauffement à la surface de la planète est bien dû à un supplément d'effet de serre, c'est certes de regarder si les modèles vous donnent une élévation de température au sol qui est cohérente avec le supplément d'effet de serre qu'on a mis dans l'atmosphère.

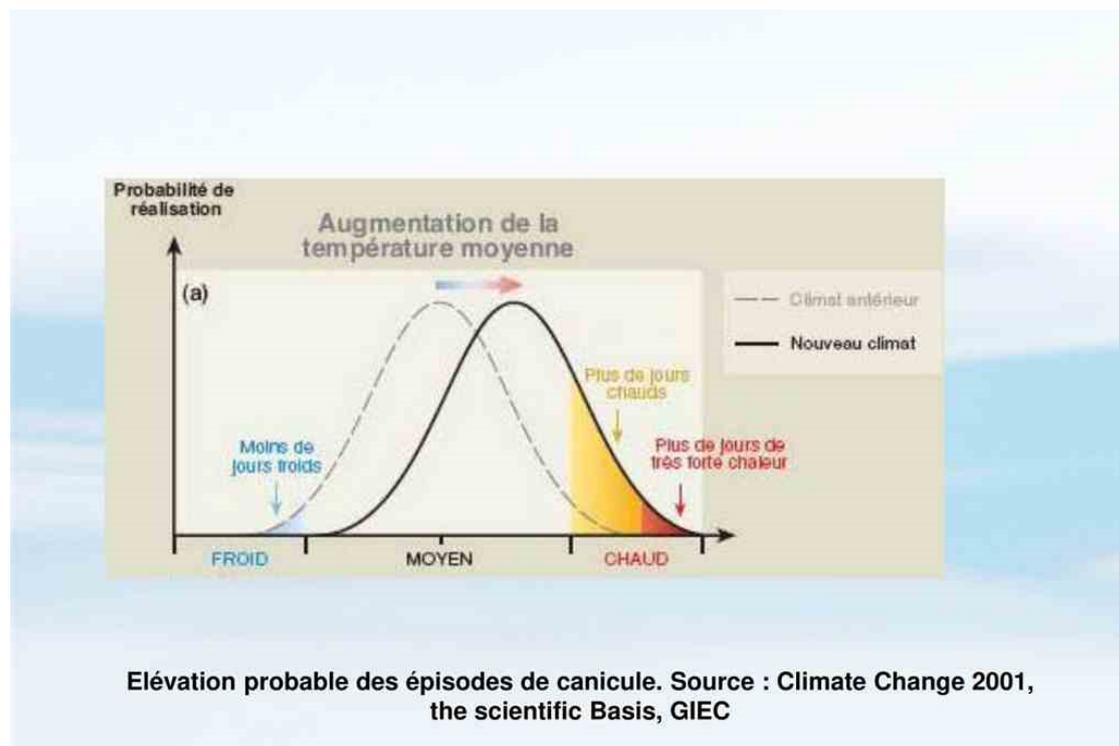
Mais une autre manière d'avoir cette confirmation, c'est de regarder si la structure spatiale de l'élévation de température correspond à ce qu'on est en droit d'attendre d'un climat qui se réchauffe avec un supplément d'effet de serre. Et je crois que je l'avais déjà dit une fois précédente, mais sinon je vais le redire : dans un climat qui se réchauffe par supplément d'effet de serre, une des choses qu'on doit s'attendre à trouver, c'est une élévation de température plus marquée sur les continents, et particulièrement marquée en zone Arctique.

Et ici, vous avez une reconstruction de la variation de température sur le 20^e siècle, et vous voyez que c'est ça qu'on observe aujourd'hui dans l'élévation de température qui est déjà observée. Vous voyez que c'est particulièrement marqué en zone Arctique, et que c'est plus particulièrement marqué sur les continents que sur les océans, où ça s'est réchauffé.

26. *UN CHANGEMENT DÉJÀ DÉCELABLE?*

Et vous voyez également – encore une fois j’y reviendrai plus tard – qu’on a bien cette singularité, ici, au sud du Groenland.

27. Un simple déplacement de moyenne sera déjà un problème



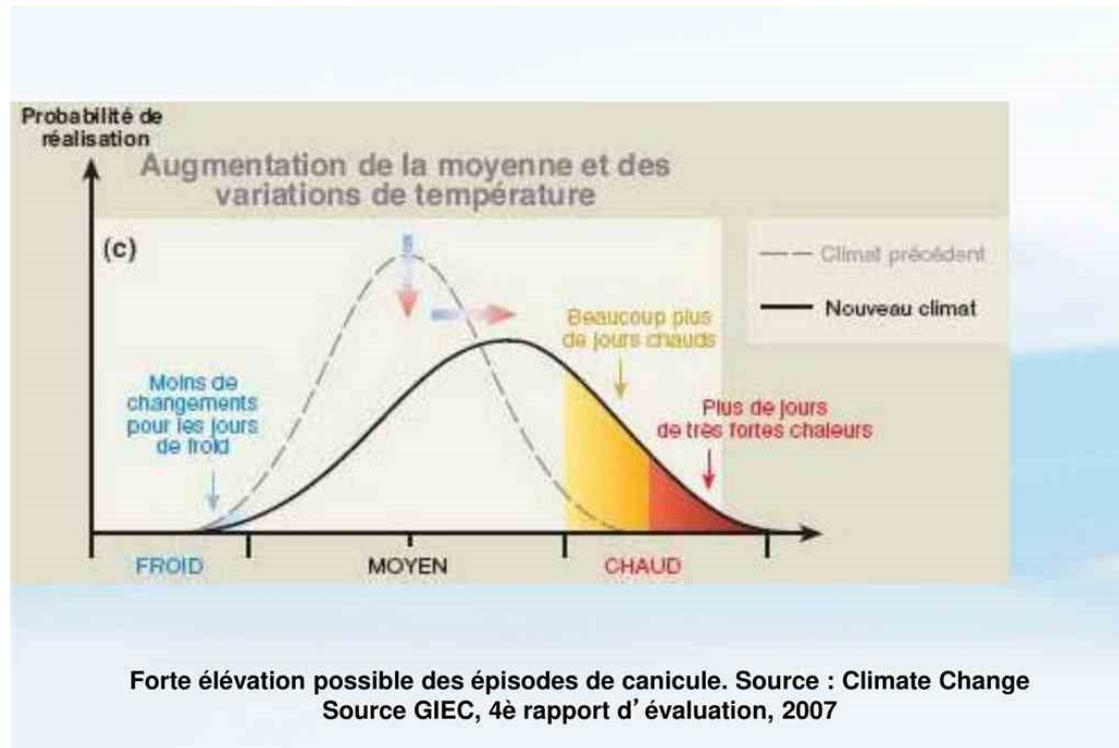
Diapositive 28.

Une des conséquences du réchauffement des températures, c'est que, bien évidemment, on va avoir une augmentation des températures maximales.

À partir du moment où les températures obéissent à une distribution, si vous ne changez pas la forme de la distribution et que vous déplacez la moyenne, vous allez voir apparaître des événements qui dépassent la température maximale que vous aviez avant.

Voyez : si la température maximale était là, et que vous déplacez votre moyenne, les températures maximales atteintes seront ici. Maintenant, tant que vous ne changez pas la forme de la gaussienne, eh bien la densité de probabilité pour les événements qui dépassent les anciennes températures maximales ne sont pas extrêmement importantes.

28. Et en plus la variabilité peut s'en mêler!



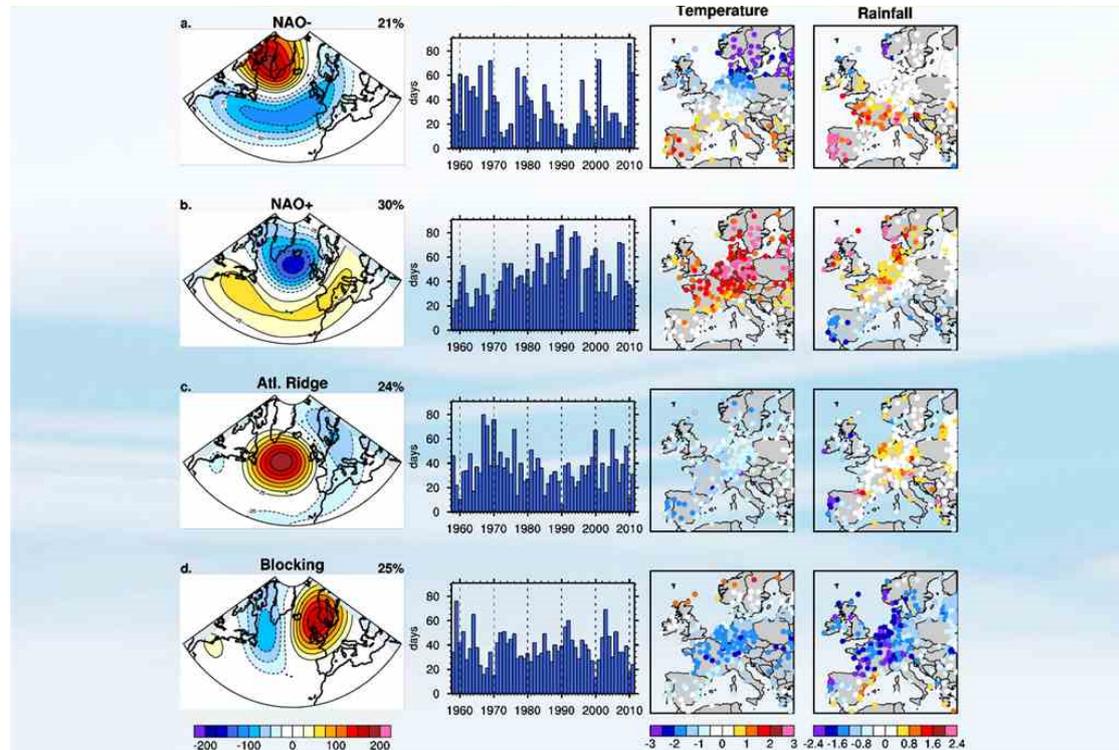
Diapositive 29.

Par contre, si dans le même temps vous augmentez la variabilité, alors là, vous allez voir apparaître une augmentation beaucoup plus importante des événements qui vont dépasser l'ancien maximum.

Or il se trouve que, malheureusement, on s'attend, dans un climat qui se réchauffe, à ce que la variabilité augmente aussi. C'est une des conséquences qui est attendue.

Ce qui veut dire que les événements extrêmement chauds, ou extrêmement secs, vont avoir tendance à augmenter plus vite que la moyenne.

29. Du global au local : une autre paire de manches



Diapositive 30.

Il y a un autre élément de variabilité qui peut entrer en jeu, et là, je vais vous donner l'exemple de l'Europe.

L'Europe, comme vous le savez, est soumise à un régime de vents d'ouest. Il se trouve qu'au-dessus de l'Atlantique, vous avez deux régimes... Enfin quatre régimes de positionnements respectifs de la dépression et de l'anticyclone qui peuvent se produire.

- Vous avez un régime, celui-là, qu'on appelle le « NAO- », dans lequel vous avez l'anticyclone au nord et la dépression au sud.
- Vous avez ici un régime dans lequel c'est l'exact inverse.
- Vous avez ici un régime dans lequel c'est une structuration est-ouest et ici un régime dans lequel c'est une structuration est-ouest inverse.

Ici, vous avez la fréquence d'occurrence de ces situations dans l'année, d'accord? Année par année. Ce que vous disent ces graphiques, c'est que avec une

29. DU GLOBAL AU LOCAL : UNE AUTRE PAIRE DE MANCHES

variabilité annuelle forte, en gros, sur quelques décennies, vous avez à peu près 25% de probabilité de vous retrouver dans l'une des quatre situations. Dit autrement, si vous regardez sur quelques décennies, vous faites abstraction de la variation annuelle. Ça, ça se produit 25% du temps, ça 25, ça 25, ça 25. Et quand vous êtes dans chacune de ces quatre situations, vous voyez ici que les températures et les précipitations présentent des anomalies par rapport à la moyenne qui ne sont pas les mêmes.

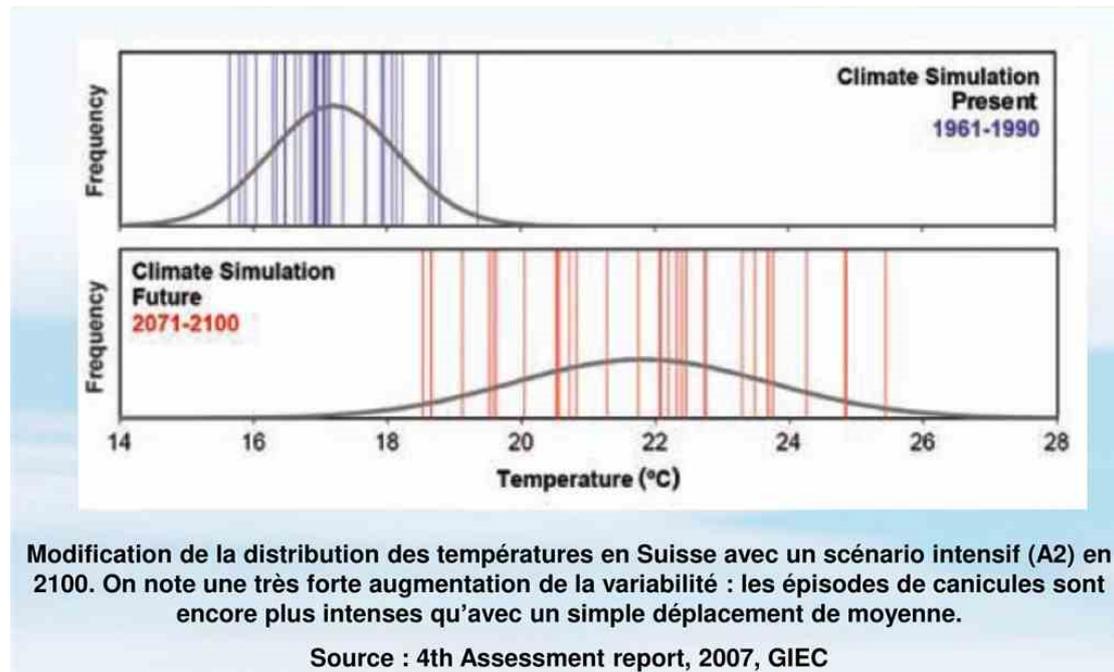
Donc, quand vous êtes en rouge, c'est que vous avez un surplus. Et en bleu, c'est que vous avez un déficit. Alors faites attention pour les températures et les précipitations, ça ne s'interprète pas de la même manière, évidemment. Et vous voyez que le surplus et le déficit ne sont pas du tout situés au même endroit en fonction de la situation que vous avez sur l'Atlantique.

Donc ici, en inversant le North Atlantic Oscillation, eh bien vous voyez que les surplus et les déficits sont, en gros, inversés sur la partie nord de l'Europe. Là c'est pareil, en inversant ces deux situations, eh bien vous voyez que sur la partie nord de l'Europe, vous avez des situations extrêmement contrastées en ce qui concerne les précipitations.

Une des questions à laquelle les modélisateurs ne savent pas répondre aujourd'hui, c'est : « Est-ce que la fréquence d'occurrence de chacune de ces quatre situations change dans un climat qui se réchauffe ? » Si la réponse est oui, ça veut dire que vous avez un phénomène d'amplification sur l'Europe par rapport à l'évolution globale. Soit dans un sens, soit dans l'autre.

Si la situation d'amplification va dans le sens de moins de précipitations et plus de température, on est beaucoup plus mal que si ça va dans l'autre sens. Et j'insiste, c'est beaucoup plus mal. Parce que vous avez un impact direct sur ce qui se mange, et un impact direct sur ce qui pousse. Et c'est très difficile aujourd'hui de savoir quoi que ce soit là-dessus avec la modélisation.

30. Et de fait la variabilité devrait s'en mêler...



Diapositive 31.

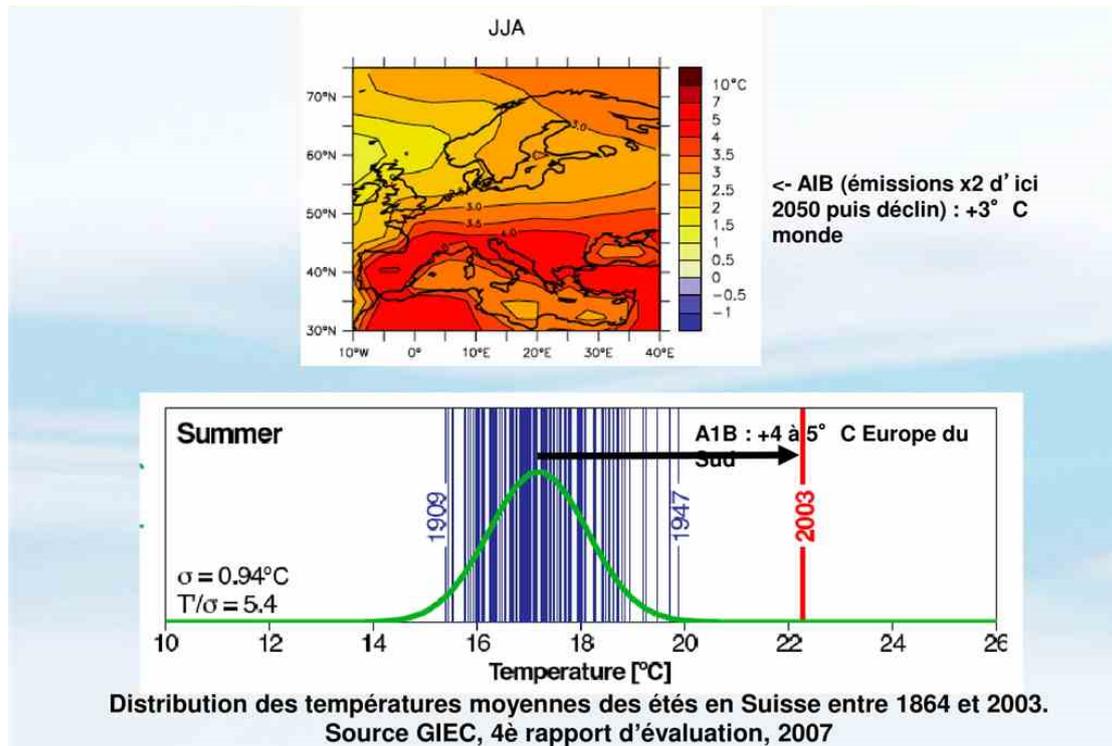
Alors application : ici, vous avez la distribution des températures en Suisse. Alors ne me demandez pas pourquoi la Suisse, mais c'est probablement parce que c'est une équipe de chercheurs suisses qui a fait ça. La moyenne de la fin du 20^e siècle. Et ici le climat futur à la fin du 21^e siècle.

Vous voyez que non seulement la distribution des températures a changé de moyenne, mais vous voyez également que la variabilité a considérablement augmenté.

Donc, les températures extrêmement élevées ne vont pas être un peu plus fréquentes : elles vont être considérablement plus fréquentes. Alors, vous êtes un peu jeunes pour vous souvenir de la canicule de 2003 peut-être. Parce que c'était quand même il y a 16 ans. Il y a 16 ans, vous n'étiez pas hauts... Qui s'en souvient de la canicule de 2003? Oui, quand même?

Eh bien, la canicule de 2003, je vais vous dire, dans un climat qui se réchauffe de quelques degrés – de quelques degrés, donc ce qu'on est parti pour faire – ça devient l'été normal.

31. L'été 2003 deviendra-t-il la norme ?



Diapositive 32.

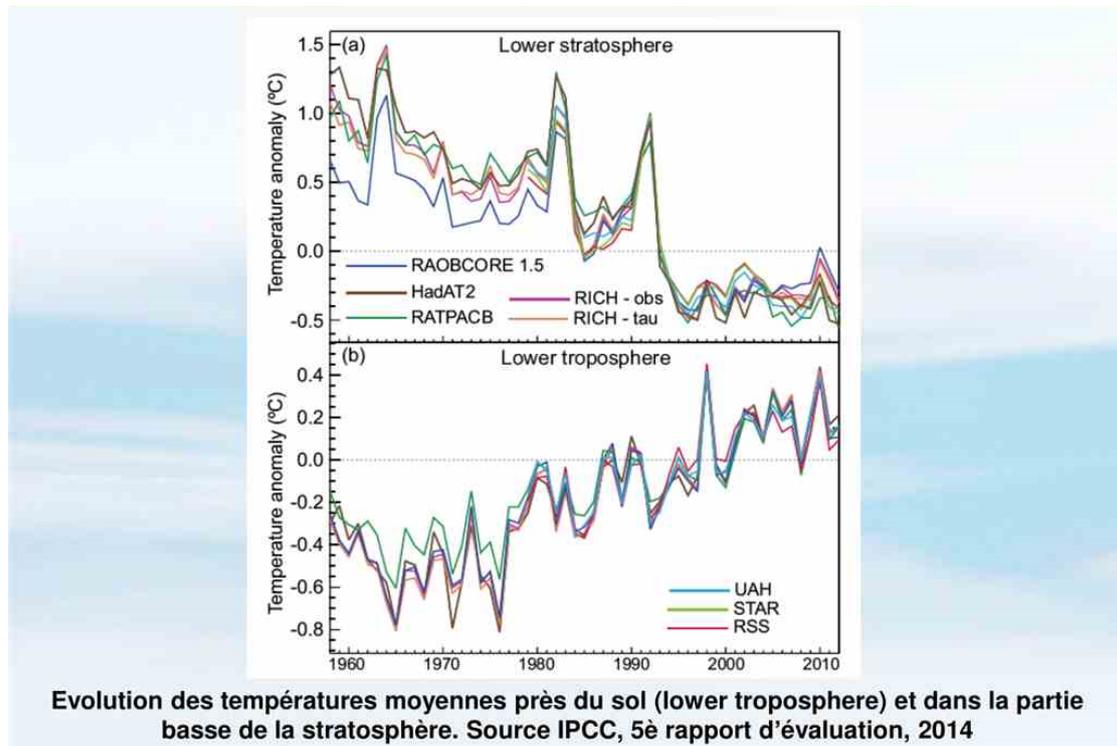
Alors l'été normal, c'est l'été normal au sens statistique. C'est-à-dire que c'est l'été qui départage 50% des étés les plus frais de 50% des étés les plus chauds.

Ça veut donc dire qu'à la fin du siècle, avec un réchauffement de quelques degrés, 50% des étés seront plus chauds que l'été 2003.

Alors, dans les conséquences que vous pouvez facilement imaginer, vous pouvez dire adieu aux forêts. On peut dire adieu à une partie des récoltes, etc. C'est assez facile de comprendre que tout ça disparaît.

Voilà, c'est pour faire comprendre qu'une variation de quelques degrés de la moyenne planétaire, ça n'est pas du tout représentatif de la limite supérieure du supplément de température qu'on peut prendre dans les épisodes les plus chauds. Ce n'est pas du tout représentatif de ça.

32. Chaud aux pieds mais froid à la tête

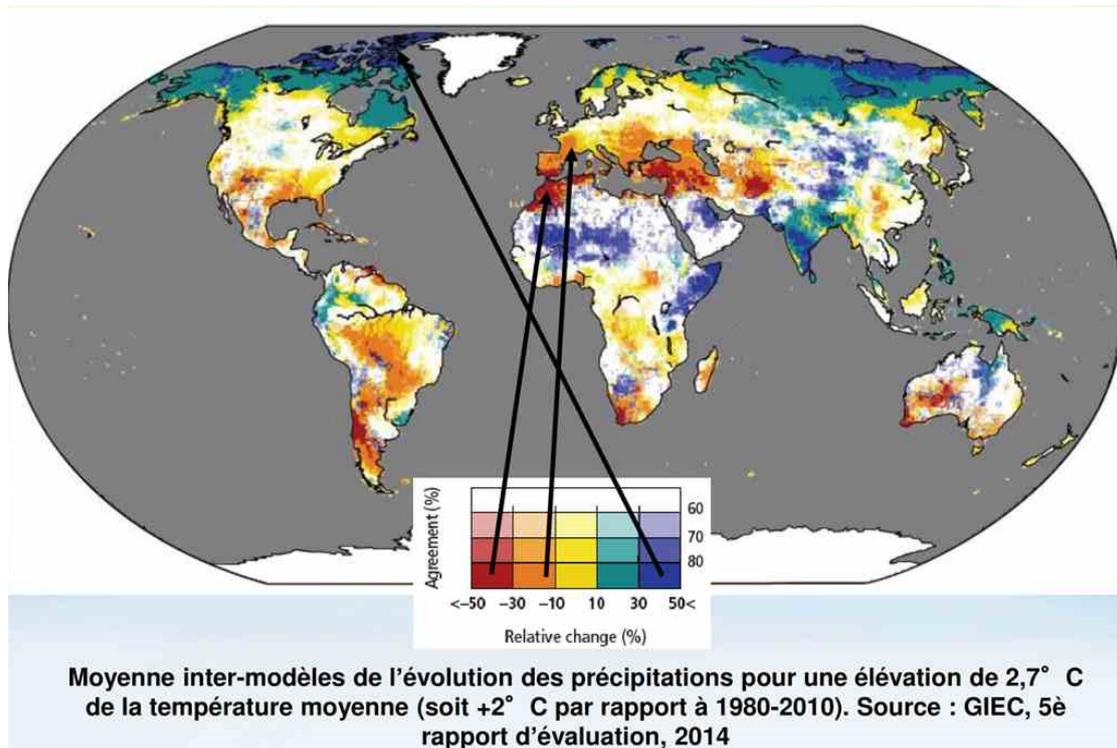


Diapositive 33.

Dans les autres marques du réchauffement climatique, au niveau du sol, qui sont attendues... Je vous en avais parlé la dernière fois en vous parlant du processus physique à l'œuvre. C'est-à-dire du fait qu'en interceptant la température plus près du sol, on allait en avoir moins qui serait interceptée dans la haute atmosphère. Eh bien on doit s'attendre à avoir un refroidissement de la stratosphère.

Ce que vous voyez sur cette courbe, c'est que depuis qu'on sait mesurer la température dans la stratosphère – c'est-à-dire depuis le début des ballons sondes –, on constate qu'elle baisse. Et elle baisse d'une façon qui est logique avec le supplément d'effet de serre.

33. Un climat, ce n'est pas juste une température moyenne



Diapositive 34.

La deuxième conséquence qu'il va y avoir avec le réchauffement climatique – ou plus exactement avec le changement climatique –, c'est une variation des précipitations.

Alors je vous ai dit au moment où je vous ai simulé le fonctionnement global du système la dernière fois (avec la petite animation que je vous ai projetée) : dans un climat plus chaud, vous avez globalement plus d'évaporation et donc plus de précipitations. Par contre ces précipitations n'ont pas de raison de se répartir de façon homogène à la surface de la planète. Ni spatialement, ni temporellement. Et la grande question est : « Qu'est ce qui se passe pour l'évolution de ces précipitations ? »

Il y a une difficulté de modélisation qui est liée à ce que j'ai évoqué tout à l'heure sur les nuages : comme les précipitations sont associées à la couverture nuageuse, si on a du mal à paramétrer la couverture nuageuse, on a une incer-

33. UN CLIMAT, CE N'EST PAS JUSTE UNE TEMPÉRATURE MOYENNE

titude – qui est plus forte que sur l'élévation de température – sur la variation des précipitations. Il n'empêche qu'on a quand même quelques conclusions assez robustes.

Alors ce que vous voyez, c'est que globalement les précipitations vont avoir tendance à augmenter fortement dans les hautes latitudes nord. Alors, ça nous intéresse qu'à moitié parce qu'il n'y a pas beaucoup de monde qui vit là-bas. Par contre, ce que vous voyez, c'est qu'il y a des régions où les précipitations vont avoir tendance à baisser. Alors, si vous regardez cette carte un peu de façon macroscopique, ce que vous constatez c'est que les précipitations augmentent aux hautes latitudes ainsi que globalement dans la bande équatoriale. Je dis bien la bande équatoriale. Par contre, elles vont avoir tendance à baisser fortement dans les bandes tropicales que vous voyez ici et là.

Et la région du monde où les précipitations vont le plus baisser, pas de chance, c'est chez nous. Vous voyez que là où les précipitations vont le plus diminuer dans l'ensemble des régions du monde, c'est le pourtour du bassin méditerranéen. Et le pourtour du bassin méditerranéen... Et notamment un certain nombre de pays, ici, qui ne sont pas du tout autosuffisants sur le plan alimentaire, et qui aujourd'hui ont besoin d'importer de la nourriture pour une population rapidement croissante.

Je n'ai pas le temps aujourd'hui, mais j'ai fait une conférence à Physique-Chimie Paris il y a quatre ans, dont le titre était « De Daech à la COP 21 », dans laquelle j'expliquais en quoi ce qu'on a appelé le « printemps arabe » a un déterminant énergie-climat extrêmement important. Et en fait, il s'est agi là-bas d'émeutes de la faim dans des pays importateurs qui n'étaient pas capables de subventionner leurs importations pour leurs populations. Et donc il s'est passé exactement la même chose qu'en 1789, c'est-à-dire : émeutes. Et la Syrie a un processus déclencheur qui n'est pas très, très éloigné.

Ce genre de choses va se répéter, d'accord ? On est parti pour que ce genre de processus se répète tout simplement parce que les précipitations vont continuer à s'affaiblir dans le pourtour du bassin méditerranéen, et donc ça va rendre encore plus difficile l'autosuffisance alimentaire de ces pays.

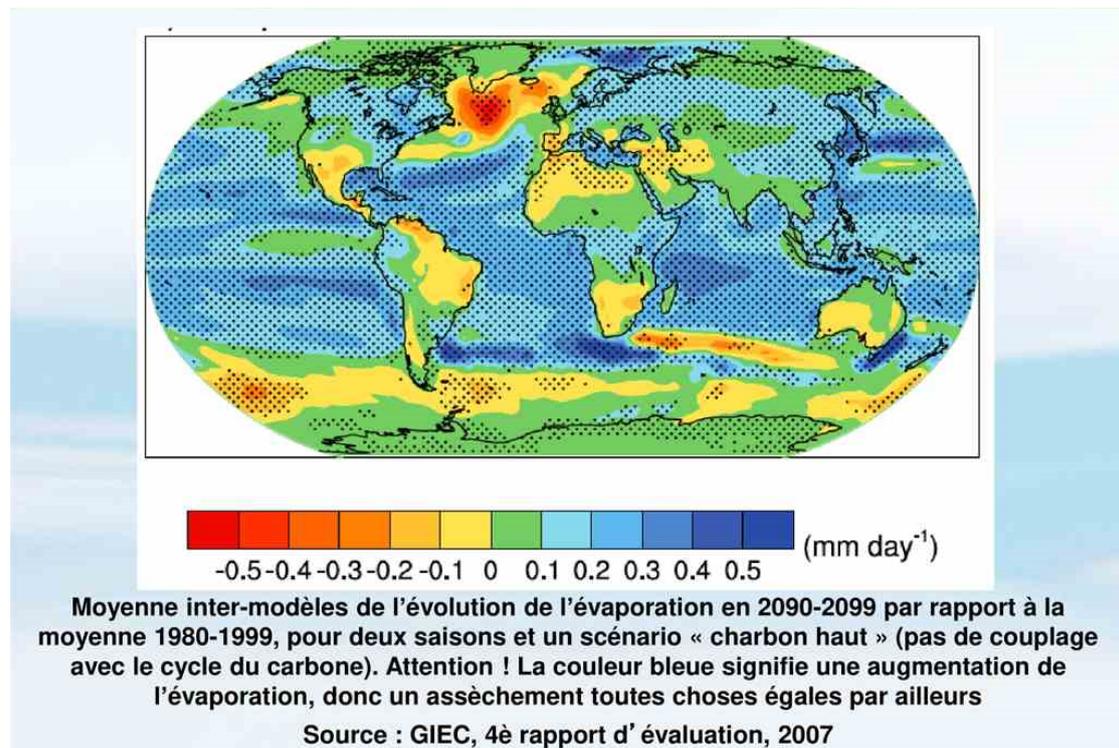
Et par ailleurs – je prends la question après – la sécheresse va malheureusement avoir tendance à remonter vers le sud de l'Europe. Et vous savez peut-être que rien qu'aujourd'hui déjà, l'Espagne a une agriculture qui est pour partie alimentée par le pompage de nappes qui ne se renouvellent pas. Donc c'est un problème qui va tout à fait concerner les Européens sur leur propre sol dans pas si longtemps que ça.

33. UN CLIMAT, CE N'EST PAS JUSTE UNE TEMPÉRATURE MOYENNE

*** Question auditoire ***

Alors quand le GIEC présente ce genre de trucs, c'est des tendances inter-modèles sur une vingtaine de modèles. Ça c'est une conclusion malheureusement très robuste. C'est-à-dire que tous les modèles convergent sur le fait que le pourtour du bassin méditerranéen va s'assécher. Vous avez des endroits, là où vous avez du blanc, où vous n'avez pas de convergence entre modèles. Là c'est malheureusement très, très convergent.

34. Un climat, ce n'est pas juste une température moyenne (2)



Diapositive 35.

Après vous n'avez pas que les précipitations qui comptent. Vous avez également la variation de l'évaporation. Parce que la teneur en eau du sol – qui vous conditionne le fait que les plantes puissent pousser ou pas – est le résultat de ce qui tombe moins le résultat de ce qui s'évapore ou de ce qui file rapidement.

Par exemple, dans les zones de mousson, où la pluie est également quelque chose qui est absolument crucial pour que les gens puissent survivre, eh bien vous pouvez avoir des précipitations qui s'intensifient, mais qui arrivent après une période sèche qui a été plus sèche, donc un sol qui est plus imperméable. Et à ce moment, l'eau ruisselle sur le sol – fait des inondations, soit dit en passant – mais n'est pas conservée par le sol. Et donc elle n'est pas « bonne » pour la végétation.

L'idéal pour la végétation, pour ceux d'entre vous qui sont allés en Irlande ou en Bretagne, c'est le petit crachin démoralisant toute l'année. Ça c'est ab-

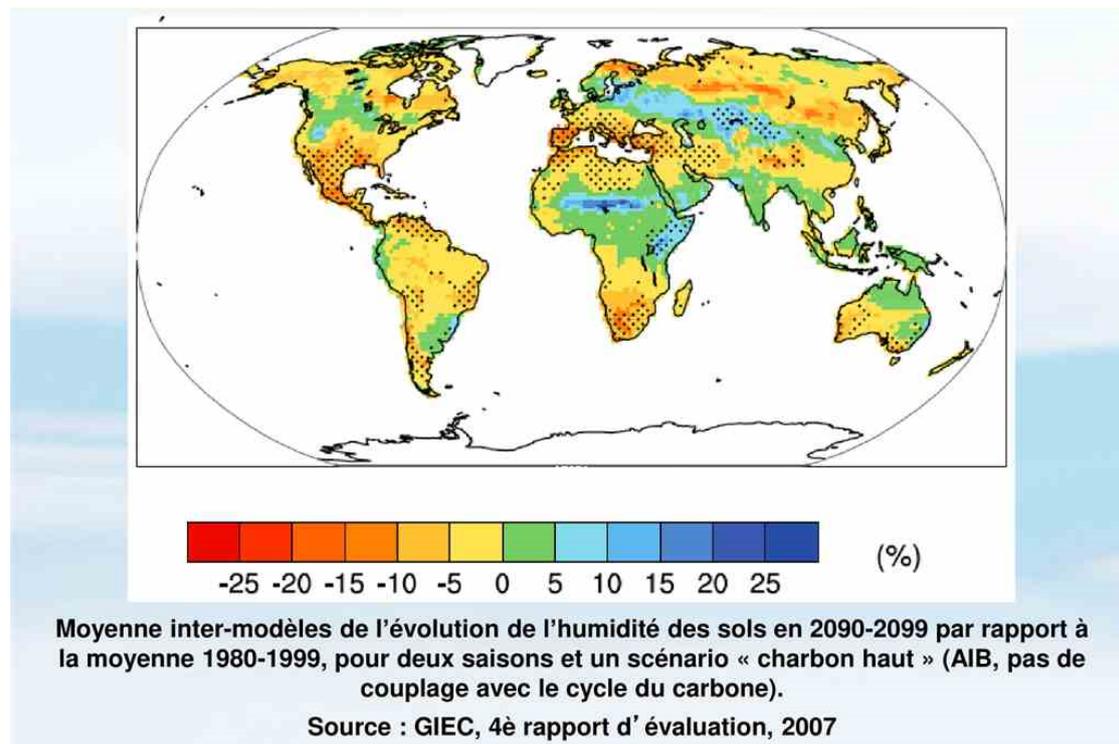
34. UN CLIMAT, CE N'EST PAS JUSTE UNE TEMPÉRATURE MOYENNE (2)

solument parfait. C'est qu'il fasse beau trois fois par jour, comme disent les Irlandais. Donc ça, c'est l'idéal. Mais quand vous avez des épisodes qui sont très concentrés, malheureusement, ce n'est pas très bon.

Alors, ce que vous voyez ici c'est l'évaporation. Faites attention parce que la graduation c'est que plus c'est bleu, plus ça augmente. Vous voyez que dans un certain nombre de régions du monde, et en particulier sur l'essentiel des terres émergées, l'évaporation se balade quelque part entre la même chose qu'aujourd'hui à plus intense qu'aujourd'hui.

Donc dans tous les cas de figure, même s'il pleut plus, vous allez avoir une évaporation, en particulier terrestre, qui va avoir tendance à s'intensifier.

35. Un climat, ce n'est pas juste une température moyenne (3)



Diapositive 36.

Donc ici, vous avez quelque chose qui est un composite de ce que je viens d'évoquer (précipitations et évaporation), et qui est l'évolution de l'humidité des sols. Donc ça en fait, ça vous pilote directement le rendement agricole (en gros), et le fait que les écosystèmes se portent bien ou pas bien.

Ce que vous voyez ici, c'est qu'on va retrouver des choses dont je vous ai déjà parlé : le pourtour du bassin méditerranéen a tendance à s'assécher. Là où vous avez des pointillés, c'est là où les conclusions sont très robustes. Je finis de commenter, je prends la question après. C'est la façon de comprendre ce graphique.

Vous voyez également cette partie de l'Australie, là, le quart sud-ouest, qui est en train de s'assécher. Un petit peu. Le sud-est aussi. Or pour ceux d'entre vous qui suivent, c'est là que vous avez des agriculteurs de temps en temps qui ne sont pas très heureux de ce qui arrive. Vous avez peut-être déjà entendu

35. UN CLIMAT, CE N'EST PAS JUSTE UNE TEMPÉRATURE MOYENNE (3)

parler des problèmes d'eau qu'il y a en Afrique du Sud. Et vous voyez que c'est cohérent avec ce que vous voyez là.

Alors ça, c'est la très mauvaise nouvelle. Si vous avez le bassin amazonien qui s'assèche, c'est quelque chose qui ne va pas être bon du tout pour la forêt. Car là, vous avez le plus grand stock de carbone sur pied de la planète.

Vous voyez également ici la sécheresse qui s'intensifie sur le sud des États-unis et sur le Mexique. Alors le Mexique, c'est comme l'Afrique du nord : population en croissance, intensification des sécheresses, et donc de l'indisponibilité en eau. C'est pareil, la question de savoir comment tout ça se termine est un gros point d'interrogation. Il y avait une question au fond...

*** Question auditoire ***

Non, parce que la vapeur d'eau condense. En fait, ce que vous avez dans l'atmosphère, c'est une pression de vapeur saturante. Et si vous évaporez plus, il pleut plus. Ça n'augmente pas la pression de vapeur saturante : ça circule plus vite, simplement. Ce qui conditionne la pression de vapeur saturante, c'est la température de l'atmosphère. Donc plus la température est élevée, et plus sa capacité en emport de vapeur d'eau... Ou en concentration de vapeur d'eau dans l'atmosphère, plus exactement... Plus elle est humide, en gros. Plus sa capacité à être humide est élevée.

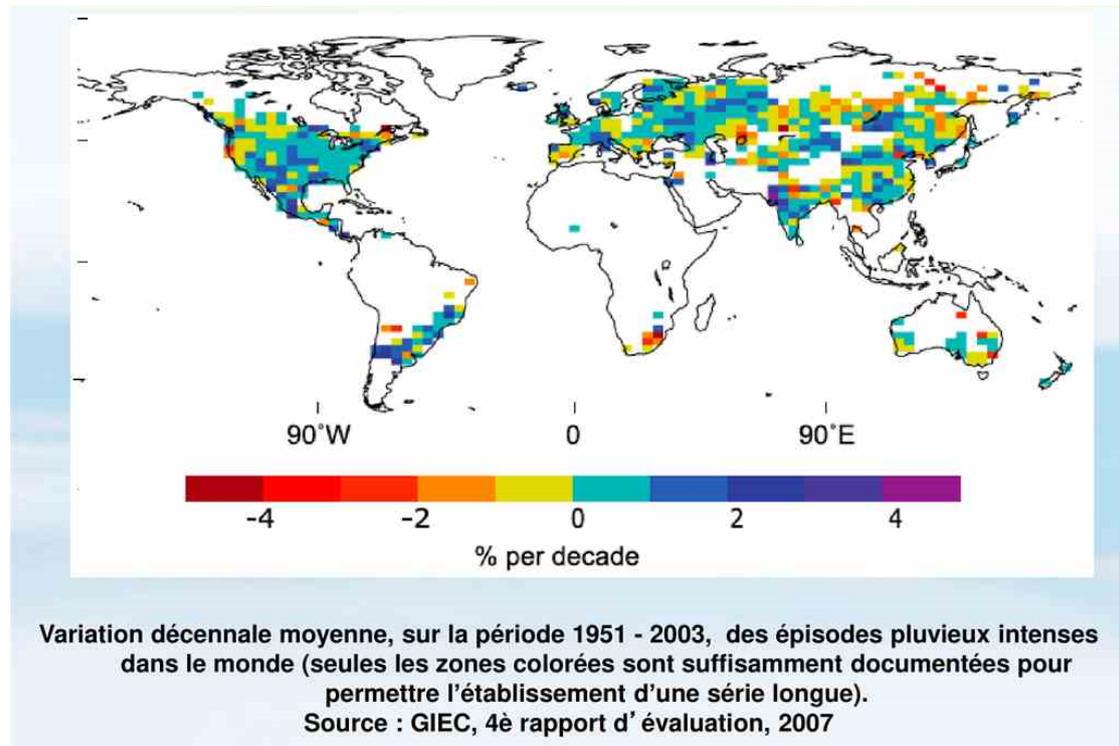
*** Question auditoire sur la rétroaction négative de l'économie ***

Oui, sauf qu'ils ne la prennent pas en compte. Oui, ça tamponnerait les émissions. Enfin ça les amortirait, ça les ferait baisser. Mais il ne le prennent pas en compte. C'est très compliqué parce que, encore une fois, vous commencez à toucher un peu du doigt la complexité du truc. Parce qu'on est dans les paramètres physiques, encore.

Après, par exemple quand on va commencer à faire des simulations agronomiques, avec l'évolution de ces paramètres physiques, on rajoute un étage de complexité. Donc il faut aller demander à vos copains de l'agro... Enfin, qui sont là encore pour le moment mais qui vont bientôt être à Saclay comme tout le monde... Il faut aller leur demander... Ne rigolez pas, vous y serez peut-être un jour. Non, je plaisante. Il faut aller leur demander comment ça marche quand on rajoute la biologie de la plante par-dessus l'évolution de ces paramètres physiques. Et la réponse est que c'est compliqué.

Vous allez voir un peu plus tard. Or ce que vous mangez, ce n'est pas des paramètres physiques, ce sont des plantes. Et les animaux qui ont mangé les plantes.

36. Déjà plus d'épisodes pluvieux intenses ?

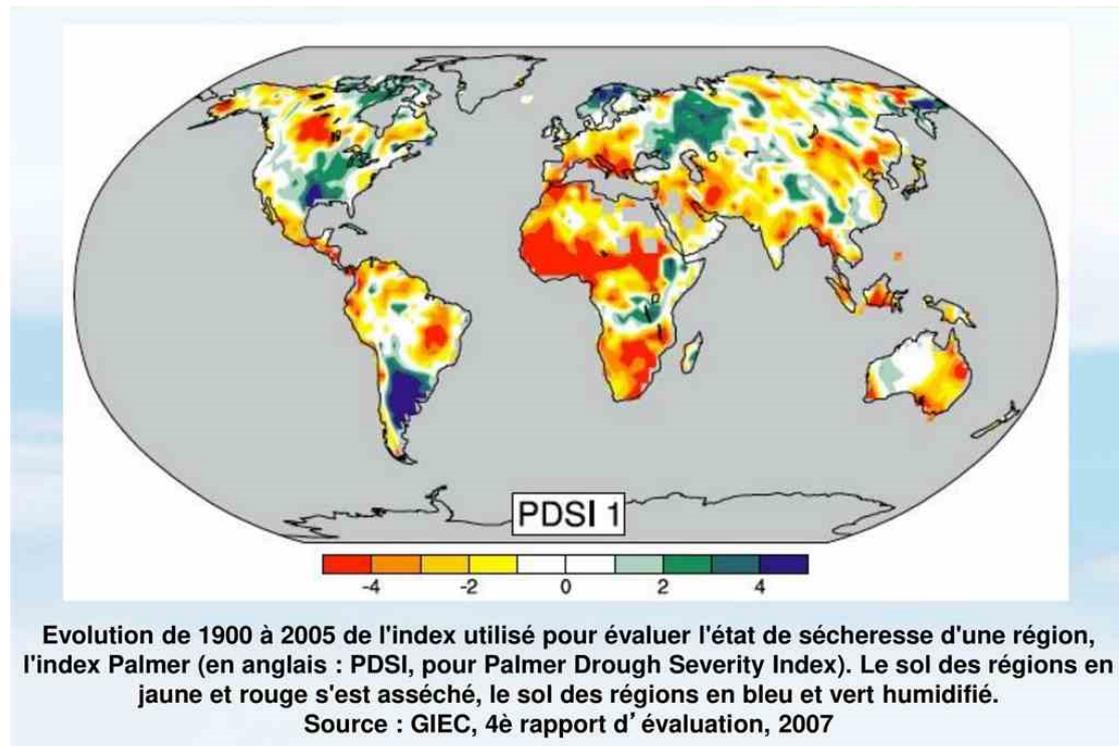


Diapositive 37.

Ce que vous donne ce graphique, c'est l'évolution des phénomènes pluvieux intenses qui sont tels que ça a été constaté, cette fois-ci dans le passé. Et vous voyez qu'il y a déjà une tendance à l'augmentation, donc là où c'est vert et bleu dans un certain nombre d'endroits.

Donc le surplus de précipitations peut arriver sous forme, malheureusement, d'une augmentation des précipitations sur des laps de temps extrêmement courts, et ça c'est perdu pour tout le monde parce que c'est de l'eau que les sols ne gardent pas, et en plus ça fait des dégâts.

37. Déjà des sols plus secs ?

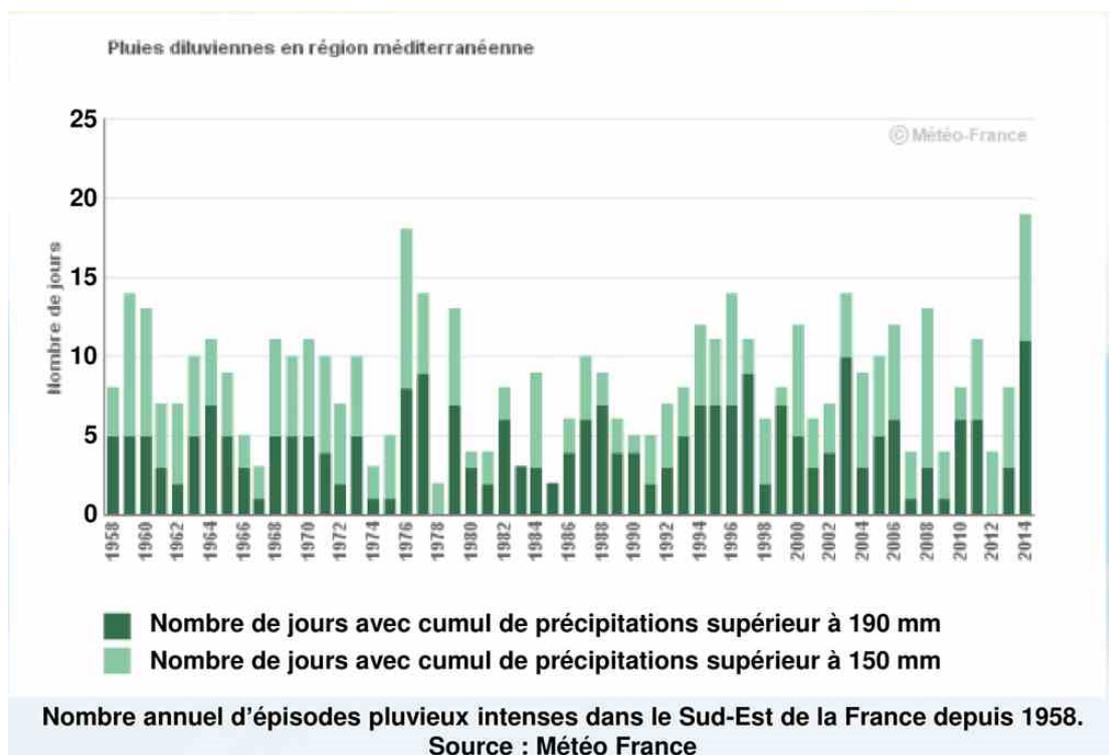


Diapositive 38.

Ce que vous voyez ici c'est aussi l'évolution passée de l'indice de sécheresse des sols. Et vous voyez qu'il y a un certain nombre de régions dans le monde où on retrouve des tendances qui sont prévues pour plus tard. Alors comme c'est au milieu du Sahara, ce n'est pas très significatif. Mais vous voyez que sur l'Afrique du Sud on retrouve ça. Sur le pourtour méditerranéen on retrouve ça. Sur le sud-est et le sud-ouest de l'Australie on retrouve ça. Sur cette partie du Brésil on retrouve ça. Et sur le sud des États-Unis on retrouve ça.

Donc il y a déjà quelques régions dans le monde où il semblerait que l'on soit déjà en train d'avoir des sols qui sont en train de s'assécher, comme on s'attend à l'avoir dans le cadre d'un climat qui se réchauffe.

38. Plus « d'épisodes cévenols » en France? Pas clair



Diapositive 39.

En France, vous avez un phénomène de précipitations intenses qui s'appelle les épisodes cévenols. Est-ce que vous connaissez? Non? Les épisodes cévenols arrivent à la fin de l'été, à un moment où la Méditerranée est encore chaude, et où la température sur la terre a commencé à se refroidir. Et ils arrivent quand vous avez de l'air humide venu du sud qui est passé au-dessus de la Méditerranée et s'est chargé en eau qui remonte en altitude. Donc, avec condensation de la vapeur d'eau en rencontrant les Cévennes – c'est à dire en rencontrant les contreforts du Massif Central –, à ce moment, il pleut des trombes. Le ministre de l'environnement chausse ses bottes et va visiter la ville qui a été inondée. Voilà, c'est ça un épisode cévenol. La fin est maintenant devenue obligatoire.

Une question qui se pose évidemment, c'est... À partir du moment où vous avez une température de surface qui se réchauffe, vous allez donc avoir une Méditerranée qui va rester chaude plus longtemps. Question : est-ce que ça ne va pas augmenter ce genre d'épisode? Alors, la réponse est que pour le moment c'est compliqué de le dire. Ce n'est pas complètement sûr que ce soit le cas.

38. PLUS « D'ÉPISODES CÉVENOLS » EN FRANCE ? PAS CLAIR

Et vous avez ici une série longue qui est faite par Météo France sur la quantité d'épisodes cévenols en France, avec deux seuils de cumul. Vous voyez ici 190 et 150, et vous voyez que ce n'est pas clair pour le moment que ce soit franchement à la hausse.

Par contre, ce qui est sûr – et donc ça c'est un deuxième truc qu'il faut avoir en tête en ce qui concerne les conséquences –, c'est que la quantité de biens à inonder augmente. Parce que la France est toujours en processus d'urbanisation. C'est-à-dire, la taille des villes continue d'augmenter. On continue de construire chaque année quelques centaines de milliers de logements. Donc ces logements, on les met quelque part. On ne les met pas en étages supplémentaires sur ceux qui existent déjà. On occupe plus d'espace au sol.

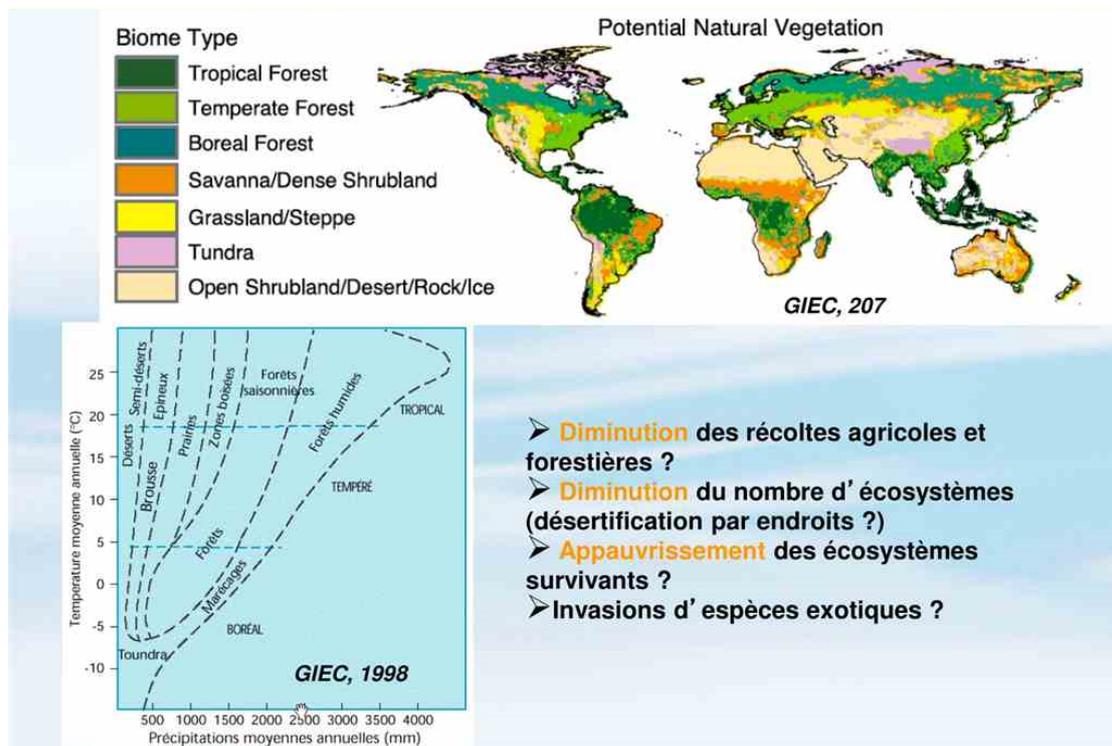
Et il se trouve que dans le sud comme ailleurs, la quasi-totalité des villes ont été construites avec un cours d'eau qui les traverse. Parce que, historiquement, c'était l'accès à l'eau potable, ou l'accès à l'eau qu'on utilisait pour autre chose, notamment pour laver le linge... Vous connaissez, vous, les machines à laver. Moi aussi. Ça n'a pas toujours été le cas... Bref. Il fallait de l'eau pour abreuver les bêtes... Donc on avait besoin d'eau. Et donc toutes les villes de France ont été construites sur un cours d'eau. Les plus grosses sur des fleuves qui servaient de voies de communication.

À partir du moment où le cours d'eau grossit rapidement parce qu'il y a un épisode cévenol, si vous avez des trucs trop près du cours d'eau, boum!, c'est inondé. Quand vous avez une pression foncière avec de nouveaux habitants qui veulent faire construire, et que vous avez déjà construit tous les endroits qui allaient bien, où est-ce que vous donnez l'autorisation de construire? Dans des endroits qui vont moins bien, et notamment trop près du cours d'eau.

Donc vous avez des constructions additionnelles en quantité croissante qui se mettent là où il ne faut pas parce que les élus ne sont pas capables de résister à la pression des électeurs. Et à ce moment, quand il y a une inondation, il y a plus de trucs qui cassent.

Le truc le plus drôle que j'ai vu, c'est une caserne de pompiers – les pompiers, normalement, sont mobilisés contre les inondations – qui était inondée.

39. Atteinte des écosystèmes continentaux et de l'agriculture



Diapositive 40.

Donc là, on était dans les paramètres physiques. À ce stade je résume.

La température va augmenter. Pas partout de la même manière : elle va augmenter plus vite en réchauffant l'océan – enfin il va y avoir plus d'énergie qui réchauffe l'océan que d'énergie qui réchauffe l'atmosphère. Et ça va impacter le régime des pluies.

Maintenant on va s'intéresser à une première conséquence sur le vivant. Parce qu'encore une fois, c'est ça qui nous intéresse vraiment.

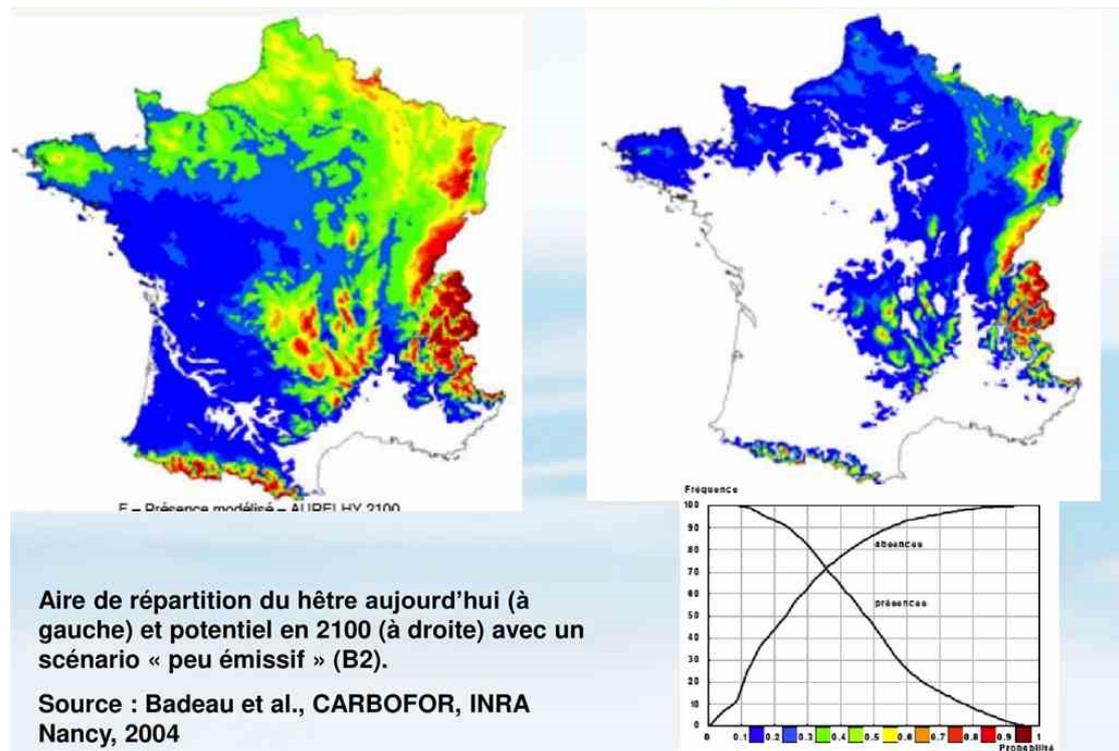
Et ici, vous avez une carte qui vous représente le type d'écosystèmes que vous avez aujourd'hui sur la surface de la planète, si on ne les coupe pas pour faire autre chose. Et vous avez surtout ici un diagramme qui vous donne le genre d'écosystèmes que vous allez trouver en fonction des précipitations et de la température. Et vous constatez – et c'est pour ça que c'est important d'avoir une bonne visibilité sur les précipitations – que vous changez beaucoup plus vite de

39. ÉCOSYSTÈMES CONTINENTAUX ET AGRICULTURE : ATTEINTES

type d'écosystèmes si vous modifiez les précipitations que si vous modifiez la température.

C'est pour ça qu'en fait, le point essentiel dans le changement climatique en cours, c'est pas tant les variations de température que les variations de précipitations, qui vont avec évidemment. Mais c'est surtout ça qui va être essentiel.

40. Exemple : le hêtre en France



Diapositive 41.

La végétation va changer. Et malheureusement elle ne va pas changer, en général, dans le bon sens. On va avoir beaucoup plus de disparitions que de créations. Parce que le temps qu'il faut pour créer quelque chose, c'est beaucoup plus long que le temps qu'il faut pour disparaître.

Les simulations que je vais vous montrer maintenant sont nécessairement des simulations partielles. Parce que les phénomènes qui sont les plus dommageables pour les Hommes et les plantes, c'est pas tant les modifications... Ou plus exactement, ça peut être les modifications de paramètres physiques – par exemple s'il n'y a plus d'eau c'est clair que les plantes crèvent –, mais vous pouvez également avoir une variation de la compétition entre espèces, qui fait d'énormes dégâts.

Dans la compétition entre espèces, vous avez typiquement ce qu'on appelle les ravageurs : les insectes, les microbes, les virus, les champignons. Alors quand je parle des champignons, ce ne sont pas les bolets. Je parle de l'oïdium, du mildiou... Enfin un truc sympathique de ce type-là. Eh bien, quand vous avez ces processus-là, ils sont extrêmement difficilement modélisables.

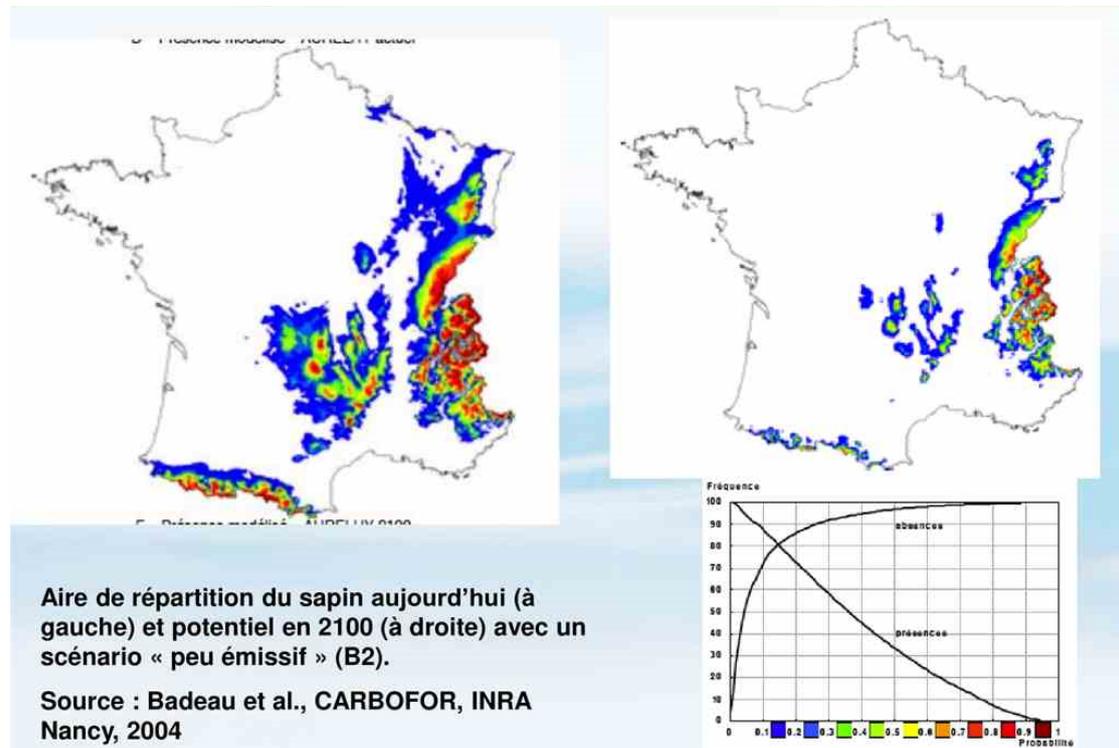
40. EXEMPLE : LE HÊTRE EN FRANCE

Dit autrement, quelle est la fraction des chênes qui vont mourir parce qu'ils vont être victimes d'attaques d'oïdium à un moment où il ne faudrait pas dans un climat qui se réchauffe : il n'y a pas un modèle aujourd'hui qui sait vous dire ce genre de truc de façon fiable. Donc ici, ce sont les précautions qu'il faut avoir sur ce que je vais vous montrer. C'est que quelque part, ce sont des bornes inférieures et ce ne sont pas des bornes supérieures. C'est comme ça qu'il faut le comprendre.

Ici, vous avez la répartition du hêtre en France aujourd'hui. Donc plus la densité est élevée, et plus on va vers le rouge. Et plus, sinon, elle est faible. Donc en gros, vous avez le droit d'avoir des hêtres partout en France. Mais globalement vous en avez plus facilement ici que là. Et plus facilement dans les Pyrénées que là.

Et à droite, vous avez la répartition des hêtres que vous pourriez avoir en 2100 dans un climat qui est modifié par le plus faible des scénarios d'émissions qu'on a vus jusqu'à maintenant. Donc vous voyez qu'il y a tout un tas de régions de France où il n'est plus possible d'avoir des hêtres, essentiellement parce qu'il fait trop sec.

41. Exemple (2) : le sapin en France

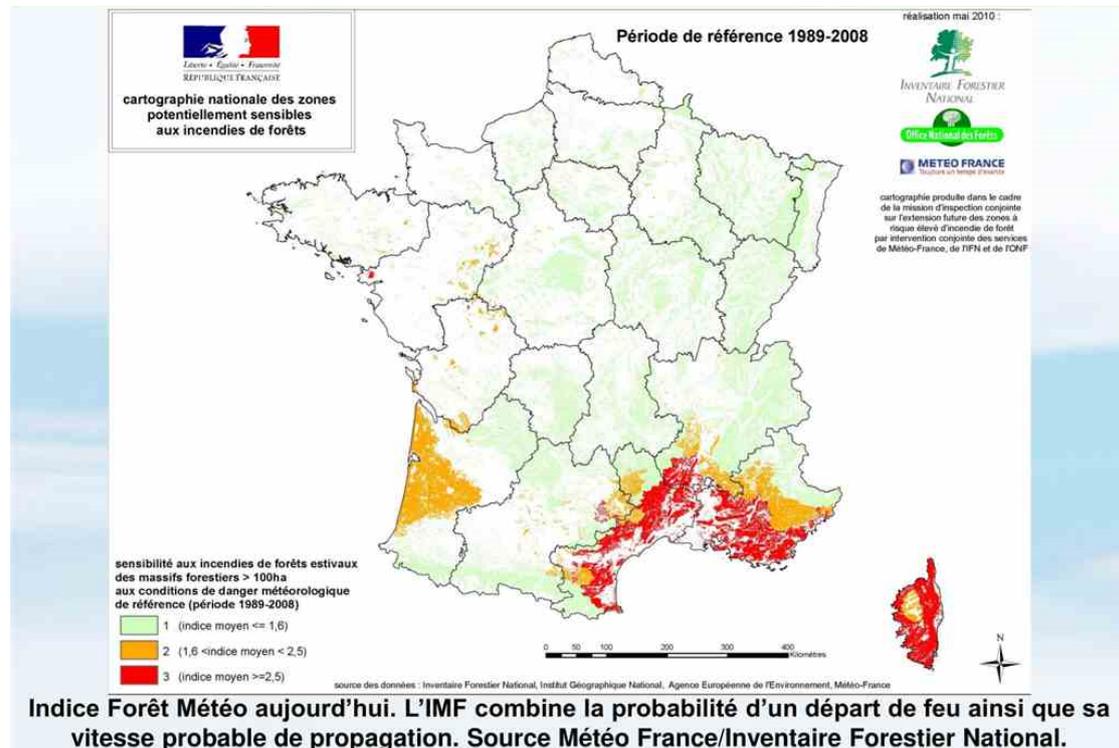


Diapositive 42.

Même répartition pour le sapin. Le sapin aime bien les endroits où il fait un peu frais l'hiver.

Eh bien vous voyez que frais l'hiver, c'est plus difficile dans un climat qui se modifie. Donc vous avez les endroits où vous pouvez avoir des sapins qui se rétrécissent.

42. Ça brûle! (aujourd'hui)



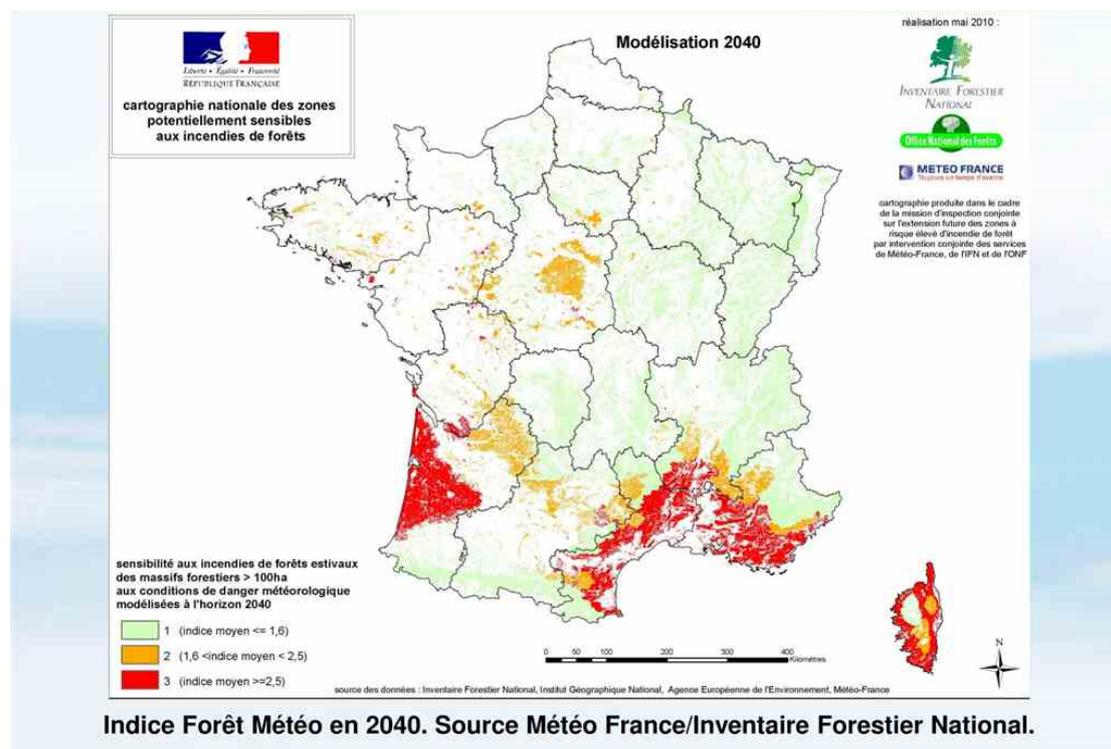
Diapositive 43.

Voilà une autre conséquence du réchauffement climatique.

Ici vous avez l'inflammabilité des forêts aujourd'hui, avec trois index : là, et là, ça brûle très facilement. Là, et là, ça brûle encore raisonnablement facilement. Ailleurs pour le moment, ça ne brûle pas.

Donc ça, c'est aujourd'hui.

43. Ça brûle! (aujourd'hui)



Diapositive 44.

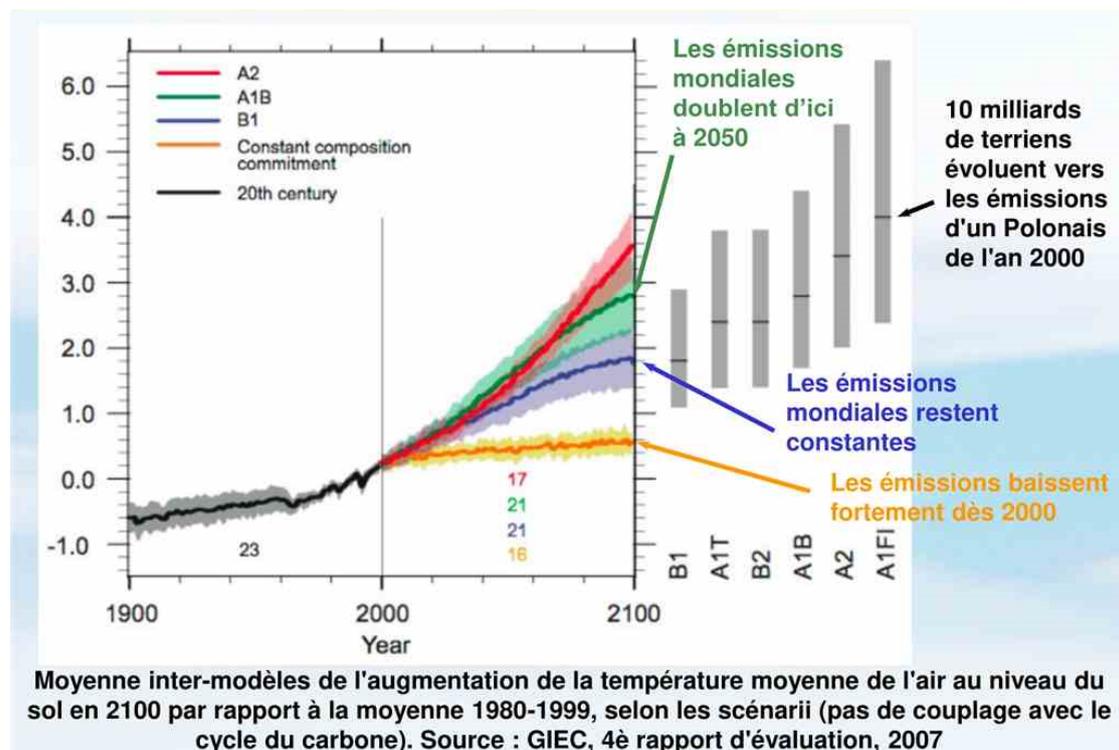
Ça, c'est en 2040.

Eh bien vous voyez qu'en 2040, l'inflammabilité de la forêt de Fontainebleau, qui est là, est celle de l'Aquitaine aujourd'hui. Donc il y aura des incendies dans la forêt de Fontainebleau. Malheureusement – j'aime beaucoup la forêt de Fontainebleau –, ce que vous voyez, c'est que l'Aquitaine brûlera aussi facilement que le pourtour du bassin méditerranéen, etc.

Je ne vous dis pas ça en étant content. Je vous dis ça parce que c'est malheureusement ce qui va se passer. Rappelez-vous que, à 20 ans... Ah non, je ne vous l'ai pas dit je crois, alors je vais vous le dire parce que c'est un truc qui est essentiel.

Je vais revenir un tout petit peu en arrière pour vous dire ça. Je vais revenir là.

44. J'y mets mes scénarios d'émission dans les modèles : quid ?



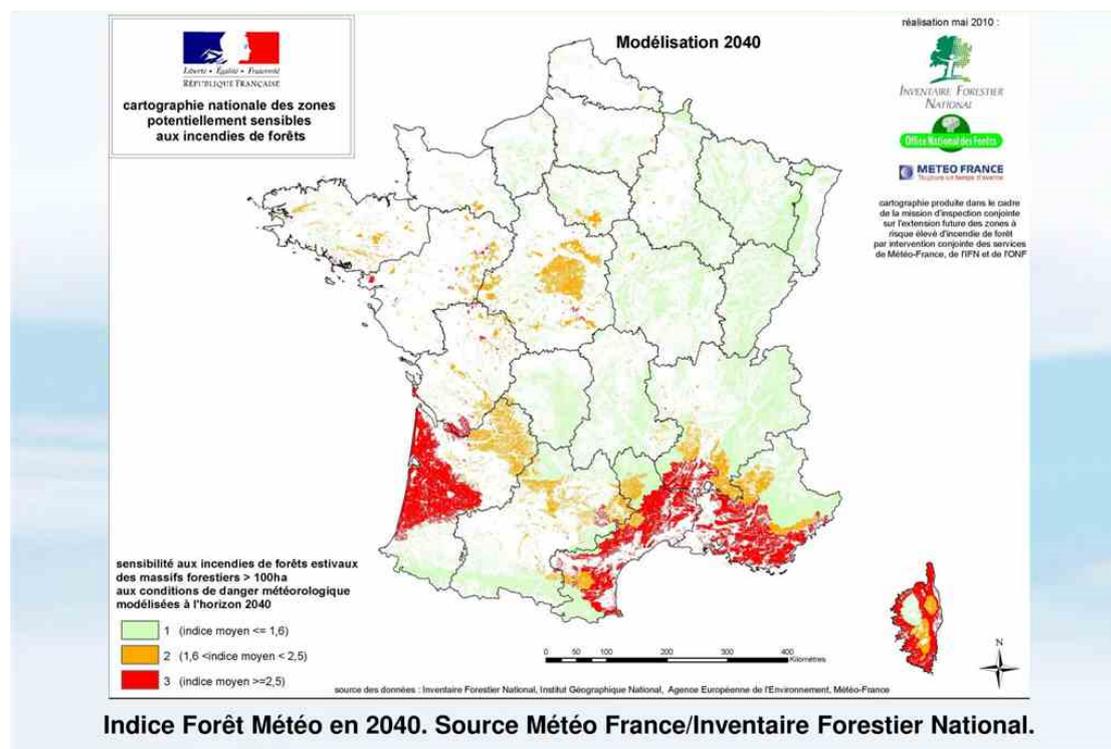
Diapositive 45.

Alors vous ne voyez pas bien sur ce graphique, mais quand même : ce que vous voyez, c'est que toutes les simulations pour l'avenir dans les 10 ans, même si on arrête les émissions, et dans les 20 à 30 ans, quel que soit le scénario d'émissions, si on les augmente, la trajectoire est exactement la même.

Donc en gros, ce qui va se passer en 2040 est totalement indépendant de ce que seront nos émissions à partir de maintenant. Ce qui va se passer *après* 2040 va commencer à être différencié en fonction de nos émissions. Mais vous voyez que avant, il n'y a pas de différence en fonction des scénarios d'émissions.

Donc il y a une conséquence absolument majeure. C'est que dans cette histoire – c'est évidemment ça qui est une des difficultés de l'affaire –, quelque part, en ce qui concerne l'atténuation du changement climatique, on travaille au mieux pour ses enfants. On travaille au mieux pour ses enfants.

45. Ça brûle! (aujourd'hui)



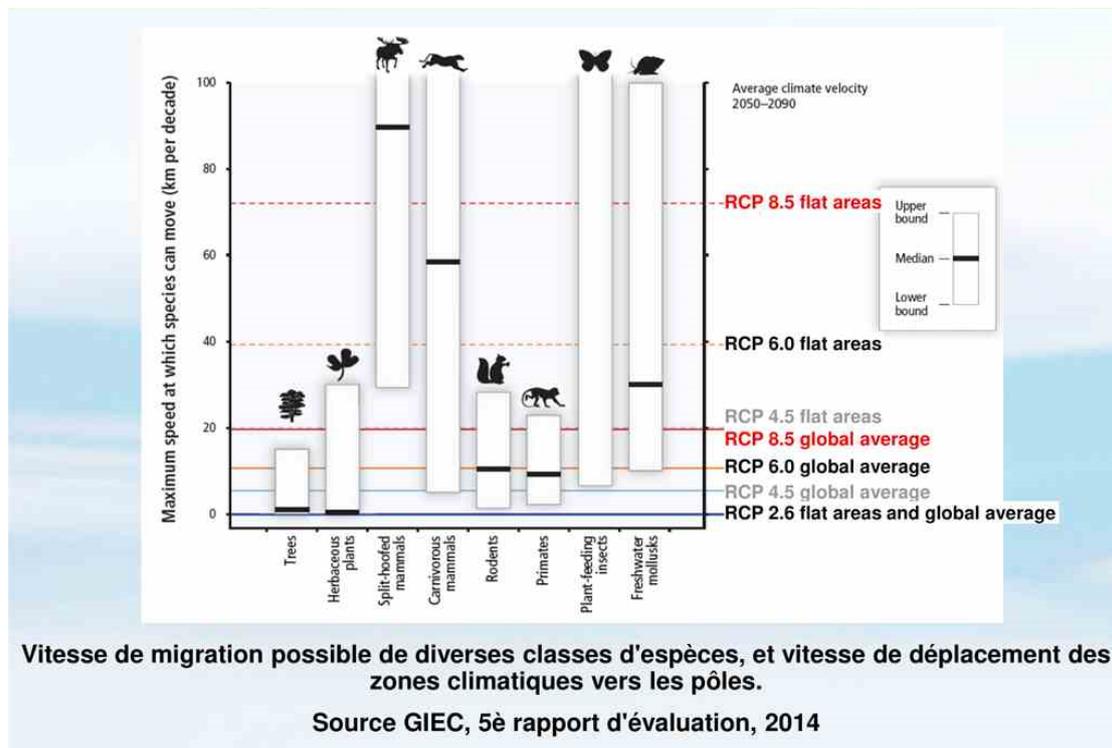
Diapositive 46.

En ce qui concerne l'adaptation au changement climatique, là on travaille clairement pour soi.

Donc le fait, par exemple, que dès à présent je vais aller mettre dans la forêt de Fontainebleau tous les dispositifs imaginables qui vont l'empêcher de brûler, ça c'est un truc qu'on fait pour soi-même. Pour sa propre génération.

Le fait de demander aux Français, aux Allemands, aux Chinois, aux Indiens, aux Américains, et aux Russes de moins émettre pour que la forêt de Fontainebleau brûle un peu moins facilement, c'est un truc qu'on fait pour la génération qui suit. C'est clair? Malheureusement. À cause de l'inertie du système.

46. Survivra, survivra pas?



Diapositive 47.

Alors on continue dans les conséquences. Ici vous avez un graphique à nouveau compliqué – parce que tous les graphiques du GIEC sont compliqués, toujours très riches en informations – qui vous donne par types d'espèces... Ici par exemple vous avez les rongeurs. Ici vous avez les mammifères. Ici vous avez les insectes. Là vous avez les arbres... Qui vous donne la plage de migration possible de l'espèce, en kilomètres par décennie.

Dit autrement, quand je vais réchauffer le climat, je vais pousser vers les pôles les zones climatiques. En termes de température. Là où j'avais les températures que j'ai aujourd'hui à 45°, dans quelques années ou quelques décennies, je vais les retrouver à 48, 50, 55° de latitude. Donc je vais pousser les zones favorables vers les pôles.

Et si je veux que mes espèces survivent, il faut qu'elles soient capables de migrer à la vitesse à laquelle les zones se déplacent. À la vitesse à laquelle vous allez déplacer les paramètres climatiques. Et ce graphique vous donne les vitesses auxquelles ces espèces peuvent se déplacer en kilomètres par décennie.

46. *SURVIVRA, SURVIVRA PAS?*

La barre noire horizontale, c'est la moyenne par catégorie d'espèces (une forme de moyenne).

Et ici, vous avez des traits de couleurs qui vous donnent les vitesses de déplacement associées aux différents scénarios d'émissions. Donc là, dans le RCP 2.6 – donc le plus bas des scénarios d'émissions –, sur les zones de plaine, en moyenne, ça va se déplacer à cette vitesse-là.

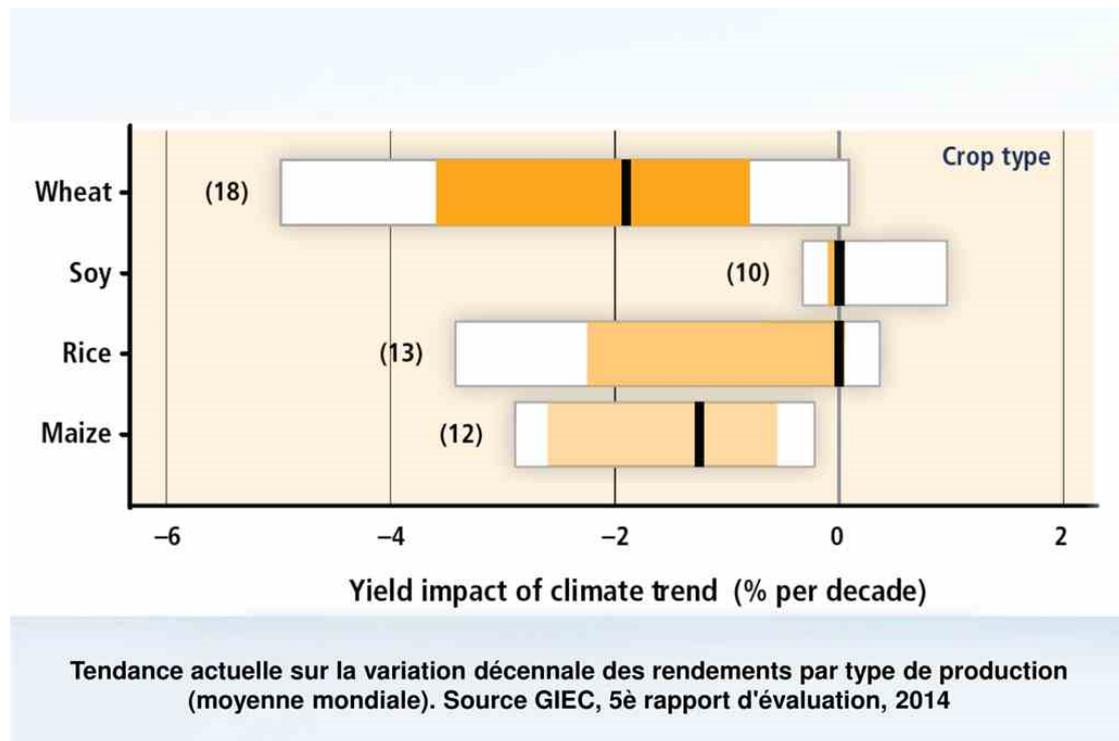
Là, vous avez les globales pour ces scénarios en plaine. Vous voyez que là où c'est plat, ça va se déplacer plus vite qu'en moyenne. Tout simplement parce que là où vous avez du relief, vous n'êtes pas obligé de monter en latitude : vous pouvez monter en altitude. Les espèces que vous avez dans les Alpes resteront dans les Alpes, sauf qu'elles seront plus hautes en altitude.

Par contre, en plaine, ça va être poussé vers les pôles. Vous voyez par exemple quand on est en RCP 6.0, vous avez une vitesse de déplacement vers les pôles qui excède de beaucoup la vitesse moyenne de déplacement vers les pôles possible pour les arbres. Parce qu'un chêne met 40 ou 50 ans à être sexuellement mature. Donc il ne fait pas des sauts de puce comme ça tous les ans pour se déplacer vers les pôles, d'accord? Il faut que ça attende le franchissement d'une génération avant que ça aille s'installer ailleurs. Donc ce graphique vous dit, en gros, qu'en RCP 6.0 ou même en RCP 4.5, vous allez perdre l'essentiel des forêts. Voilà.

En ce qui concerne les espèces herbacées c'est pareil, vous allez en perdre une partie. Par contre pour les mammifères... Sauf que si vous n'avez plus de quoi manger pour les mammifères, ce truc-là devient partiellement virtuel, etc.

Donc vous voyez que pour la base des écosystèmes, c'est-à-dire les plantes, vous avez une vitesse de migration possible de ces écosystèmes vers les pôles qui est très inférieure, pour l'essentiel des espèces, à la vitesse de déplacement des paramètres climatiques qu'on va observer. C'est ça que vous dit ce diagramme. Et donc, quand on dit qu'il y aura une perte d'écosystèmes, c'est exactement à ça que c'est dû.

47. Poussera, poussera pas ?



Diapositive 48.

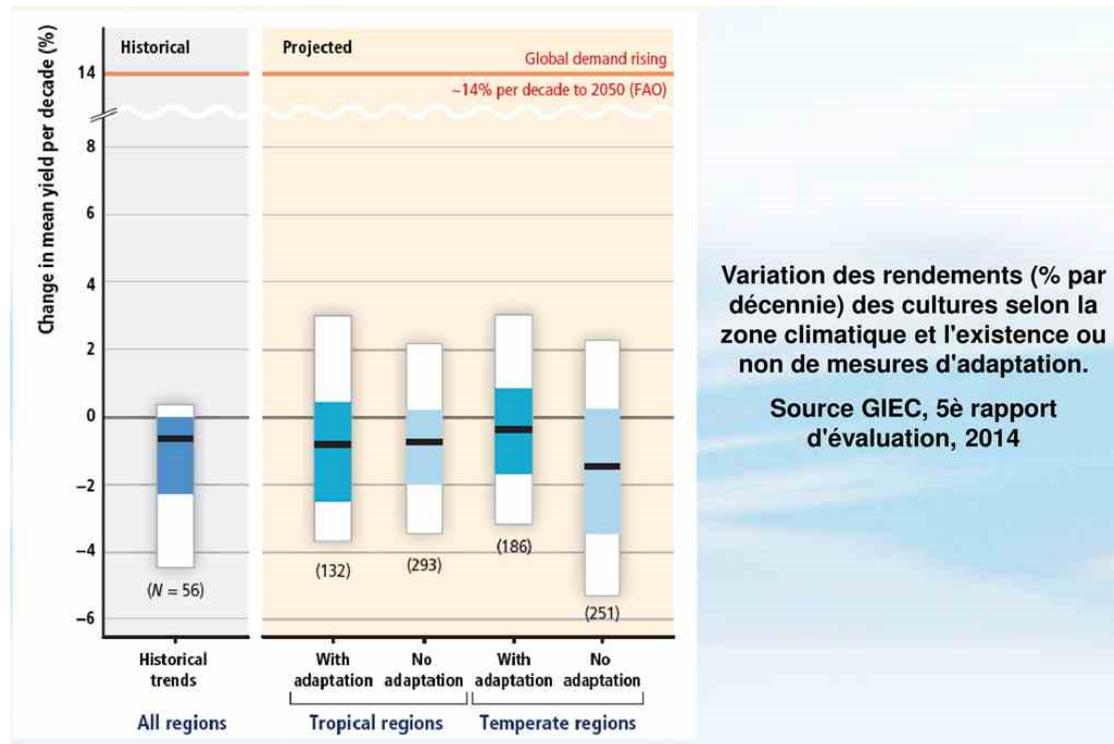
Là vous avez un graphique qui vous parle, cette fois-ci, non pas des écosystèmes sauvages, mais des écosystèmes dirigés, c'est-à-dire de l'agriculture.

L'agriculture est un écosystème monospécifique dirigé. C'est-à-dire que vous avez une seule espèce – « monospécifique » –, celle qui pousse, qui nous intéresse. Les autres on s'en fout. Alors maintenant c'est un peu moins vrai parce qu'on essaye de commencer à faire des choses différentes.

Ce graphique vous donne la tendance actuelle – je dis bien la *tendance actuelle* – sur la variation par décennie des rendements agricoles. Vous voyez que dès à présent, vous avez deux espèces – qui sont le blé et le maïs – sur lesquels on a déjà une tendance à la baisse sur les rendements agricoles.

Vous avez ici les quatre principales céréales cultivées dans le monde : le blé, le soja, le riz et le maïs, dont la production annuelle est de l'ordre de 2 milliards de tonnes. Un peu plus de 2 milliards de tonnes. Et vous voyez que, pour le moment en tout cas, il n'y en a pas une qui en profite.

48. Mangera, mangera pas ?



Diapositive 49.

Ici, ça vous donne le résultat prospectif.

Donc le résultat prospectif (quand vous faites des simulations), c'est qu'on s'attend (avec une barre d'erreurs importante évidemment) à ce que les rendements agricoles continuent à décroître à l'avenir, sous l'effet du réchauffement climatique.

Et vous voyez que là où ça pourrait baisser le plus vite, c'est dans les régions tempérées si on n'a pas de mesures d'adaptation. Sauf que dans les mesures d'adaptation, vous avez par exemple l'irrigation. Et l'irrigation c'est pas nécessairement quelque chose qui est facile à mettre en œuvre. Parce que s'il s'arrête de pleuvoir de façon significative – enfin s'il pleut moins –, l'irrigation n'est pas nécessairement beaucoup plus simple.

Alors ça, c'est quelque chose qui est absolument majeur sur une planète dont la population, par ailleurs, a tendance à augmenter – pour le moment. Parce que je vous rappelle ce vieux dicton, encore une fois, qui est à l'origine de 1789 :

48. MANGERA, MANGERA PAS?

« Ventre affamé n'a point d'oreille. » Dit autrement, quand les gens n'ont pas mangé, ils deviennent fous. Et c'est normal.

Donc le fait que les rendements agricoles baissent, pour répondre à la question de tout à l'heure, à quel moment cela provoque-t-il soit des migrations, soit des guerres? Strictement aucune idée. Ou des émeutes? Ou des révolutions? Personne ne peut le dire. N'importe quand entre maintenant et plus tard. C'est typiquement ça, les choses qui nous prendront par surprise. C'est absolument évident. Une partie des surprises ça viendra de là.

*** Question auditoire ***

Oui, il est interprétable. Il y a un gros risque. Quand il y a une grosse incertitude, je le répète, il y a un gros risque. Ça veut dire que vous ne pouvez pas exclure la possibilité que vous soyez là.

Soit dit en passant, l'année dernière en Europe, en 2018, vous avez eu une baisse de rendement de 20 à 30% dans certaines cultures (les pommes de terre, une partie des céréales, etc.). En Russie en 2010, vous avez eu une baisse de 45% de la production de céréales. Et c'est le début du 21^e siècle.

*** Question auditoire ***

Il peut y avoir des augmentations. Sauf que si vous comparez la Russie et la Pologne, ce n'est pas les mêmes surfaces cultivées et ce n'est pas les mêmes tonnages, d'accord? Et puis par ailleurs, ça ne sert pas les mêmes marchés, ce n'est pas nécessairement les mêmes céréales, etc.

*** Question auditoire ***

Non. La pomme de terre, l'année dernière, ça a souffert chez tout le monde de mémoire.

*** Question auditoire ***

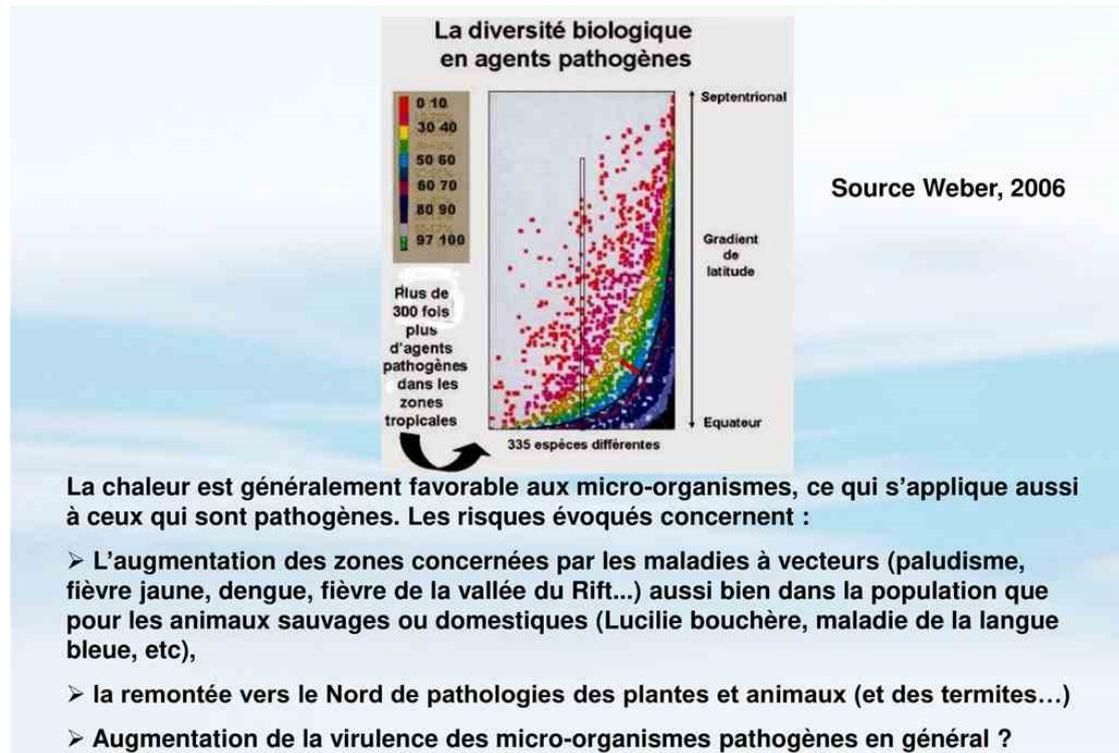
Non, ce sont des variations annuelles. Tant que vous avez des stocks, et les moyens énergétiques d'avoir des stocks (c'est-à-dire des frigos, des machins, etc.), ce n'est pas très grave. Au Moyen-Âge, quand on n'avait pas les moyens d'avoir des stocks, si on avait une baisse de 40% de la production une année donnée, les gens mouraient de faim. Révolution quoi.

Donc là, pour le moment, c'est l'énergie abondante qui nous permet de nous adapter à beaucoup de choses. Mais cf. le deuxième cours : l'énergie abondante, elle n'est pas éternelle. Et l'essentiel... Les conséquences du changement climatique vont s'intensifier dans la deuxième moitié du 21^e siècle, à un moment où l'énergie abondante, pour partie, ne sera plus là. Donc il va y avoir un effet de tenaille.

48. *MANGERA, MANGERA PAS?*

C'est pour ça aussi que les conséquences sont particulièrement difficiles à prévoir. En général, les gens qui s'intéressent aux conséquences du réchauffement climatique, ils raisonnent – comme beaucoup de spécialistes – « toutes choses égales par ailleurs ». Donc pour eux, ça ne fait pas l'ombre d'un doute qu'il y aura toujours des engrais, des tracteurs, des phytosanitaires efficaces, des chaînes du froid, etc. Sauf que ce n'est pas sûr. Ou plus exactement, c'est sûr que ce sera l'inverse au bout d'un certain temps. C'est juste une question de temps.

49. Impact sur la santé : fiche biodiversité!



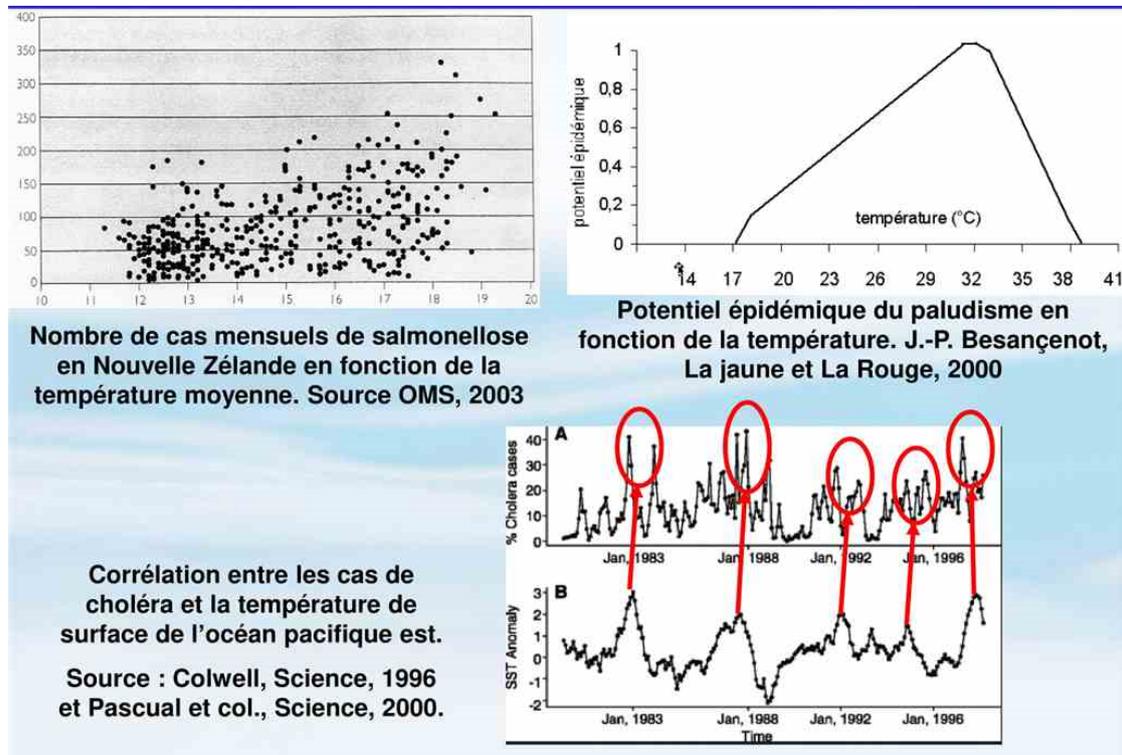
Diapositive 50.

Dans les autres conséquences du changement climatique, on va changer la biodiversité microbienne.

C'est très facile à comprendre. Quand on chauffe un bouillon de culture, tant qu'on ne le chauffe pas trop, si on chauffe juste un peu, les petites bêtes aiment bien ça. Et donc dans un monde qui globalement se réchauffe, on va avoir tendance à favoriser l'augmentation de la biodiversité microbienne, qui a tendance, comme vous pouvez le voir ici, à être plus élevée quand on est dans des endroits chauds.

Bon là, c'est la bouteille à l'encre. C'est-à-dire qu'à part vous dire ça, je ne suis pas capable de vous en dire beaucoup plus. Mais c'est évident que viendra un moment où il y aura des nouveautés en ce qui concerne les maladies. Alors il n'y a pas que ça comme facteur déclencheur d'une nouvelle maladie, loin s'en faut.

50. Impact sur la santé : exemples



Diapositive 51.

Je ne vais pas détailler ça. Juste ça. Ça c'est rigolo. Enfin, c'est rigolo... Non. Pas rigolo du tout.

Vous avez ici, pour le Bangladesh, en haut la variation des cas de choléra, et en bas la variation de la température de surface de l'eau du Pacifique. Alors vous voyez que quand il y a une augmentation de la température de surface de l'eau du Pacifique, en l'occurrence du Pacifique Est, vous avez une augmentation du nombre de cas de choléra au Bangladesh.

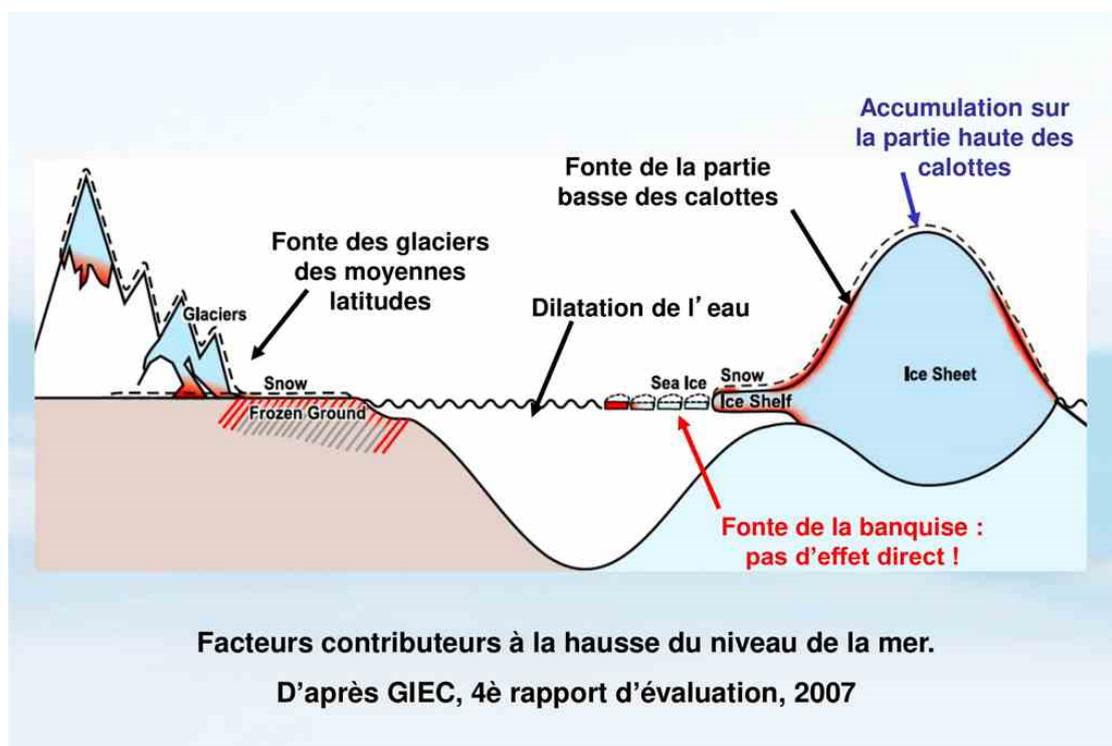
Est-ce que vous savez comment s'appelle l'élévation de température du Pacifique Est? Ça s'appelle « El Niño ». Quand vous êtes en condition « El Niño », vous avez tendance à avoir une modification du régime des pluies. Et du coup vous avez une augmentation des eaux saumâtres au Bangladesh – c'est-à-dire des eaux qui mélangent les eaux de mer et les eaux douces, qui favorisent le développement du vibron du choléra. Donc vous avez plus de gens qui sont malades du choléra.

50. IMPACT SUR LA SANTÉ : EXEMPLES

Voilà quelque chose... Personne je pense n'aurait été capable de proposer à l'avance un raisonnement de cette nature. C'est-à-dire : quand il y a une augmentation de la température de surface du Pacifique, crac !, vous allez avoir plus de cas de choléra.

Voilà, c'est typiquement le genre de conséquences que vous pouvez comprendre après, en étant très difficile de prédire avant.

51. Élévation du niveau des océans : Archimède or not?



Diapositive 52.

On va maintenant parler de l'élévation du niveau de la mer.

Ici vous avez une représentation schématique – très schématique même – des terres émergées (avec les montagnes, sur lesquelles il y a des glaciers pour certaines), de l'océan, et des calottes glaciaires (que vous avez ici). Tout ça participe à la variation du niveau de l'eau.

La première chose qui va se passer avec l'eau, c'est que, comme je vous l'ai dit tout à l'heure, la quantité de chaleur emmagasinée par l'eau augmente. L'eau chaude a tendance à occuper plus de volume que l'eau froide (puisque l'eau se dilate quand elle chauffe). Et comme le niveau du fond de la baignoire ne varie toujours pas, ça veut dire que le niveau de la baignoire augmente quand vous chauffez l'eau. Et donc le niveau de l'eau monte.

La deuxième chose qui va faire monter le niveau de l'eau, c'est quand vous faites fondre un glaçon qui est posé sur la terre. Vous avez un premier glaçon,

51. ÉLÉVATION DU NIVEAU DES OCÉANS : ARCHIMÈDE OR NOT ?

ou une première série de glaçons posés sur la terre, qui sont les glaciers des moyennes latitudes. Typiquement la mer de Glace.

Pour ceux d'entre vous qui sont allés à la mer de Glace, vous avez peut-être vu qu'avant de prendre le train du Montenvers, quand on remonte vers la gare, il y a des escaliers en métal. Et le long des escaliers en métal vous avez des pancartes qui vous disent à quel niveau était la mer de glace il y a dix ans, il y a cinq ans, il y a vingt ans, etc. C'est extrêmement spectaculaire. Ça perd quelques mètres tous les cinq ans. Ça va à une vitesse hallucinante. En épaisseur évidemment. Et donc, cette eau, puisqu'elle n'est plus dans la mer de Glace, elle se retrouve dans la mer.

Après, vous avez les calottes qui vont avoir un impact sur le niveau de l'eau. Les calottes peuvent avoir deux types, ou trois types d'impacts plus exactement, sur le niveau de l'eau. Il y en a deux qui sont présentés ici, le troisième je vous en parlerai après.

La calotte va de 3000 m d'altitude, au niveau de l'eau, en gros. Puisque là où elle « vèle » des icebergs, là où elle se termine, vous êtes au niveau de la mer. Au sommet de la calotte, vous êtes à 3000 m d'altitude. Donc pour faire le lien avec la mer de Glace, c'est comme entre la vallée de Chamonix et le Mont-Blanc : il ne fait pas exactement la même température.

En bas de la calotte vous allez avoir fréquemment des températures positives. À ce moment, la glace fond et contribue à l'élévation du niveau de la mer. Mais au sommet de la calotte, vous avez souvent des températures négatives, voire constamment des températures négatives. Et donc là, la neige qui tombe retire de l'eau à la mer. L'eau était dans la mer, elle s'évapore, elle tombe sur la calotte, elle reste sur la calotte, donc ça fait baisser le niveau de la mer.

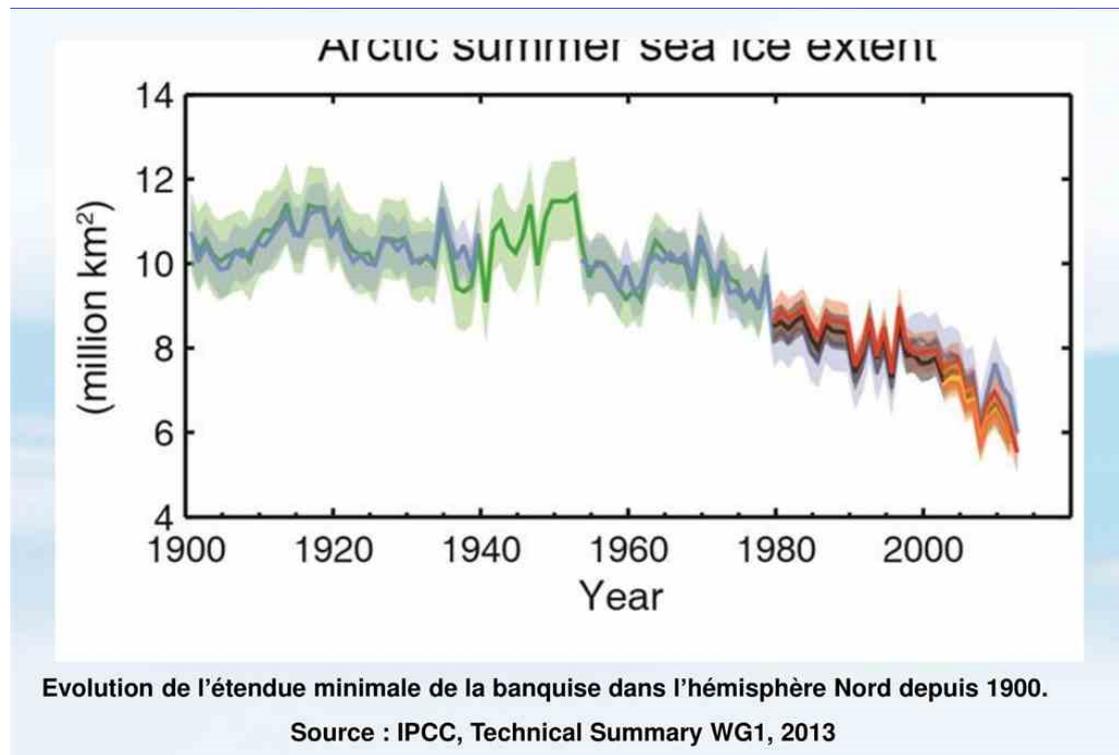
Donc en ce qui concerne les calottes, il faut faire un bilan de masse qui est : ce qui tombe là, moins ce qui s'en va là. Et c'est la différence entre les deux qui vous dit si la calotte contribue à la hausse du niveau de la mer ou à la baisse du niveau de la mer. Quand la calotte se forme sur la Scandinavie, manifestement, ce qui va là est plus important que ce qui va là, et le niveau de la mer baisse : ce que je vous ai montré tout à l'heure. Aujourd'hui, c'est plutôt l'inverse : ce qui se passe là est supérieur à ce qui se passe là, et donc la calotte contribue à l'augmentation du niveau de la mer.

La fonte de la banquise, puisque vous connaissez tous Archimède, n'a pas d'impact sur le niveau de l'eau. Quand vous faites fondre de la glace qui flotte déjà à la surface de l'eau, Monsieur Archimède vous dit que ça ne bouge pas le niveau de l'eau. Par contre Monsieur pas-Archimède, c'est-à-dire le physicien,

51. *ÉLÉVATION DU NIVEAU DES OCÉANS : ARCHIMÈDE OR NOT?*

vous dit que ça a quand même un impact. Parce que vous remplacez une surface particulièrement réfléchissante qui est la banquise, par une surface particulièrement absorbante qui est de l'eau de mer. Donc ça accélère le réchauffement de l'eau de mer qui entoure la calotte, et ça, ça accélère la fonte ou la désagrégation de la calotte. Donc il n'y a pas d'effet direct, mais il y a un effet indirect.

52. Not Archimède : la banquise fond



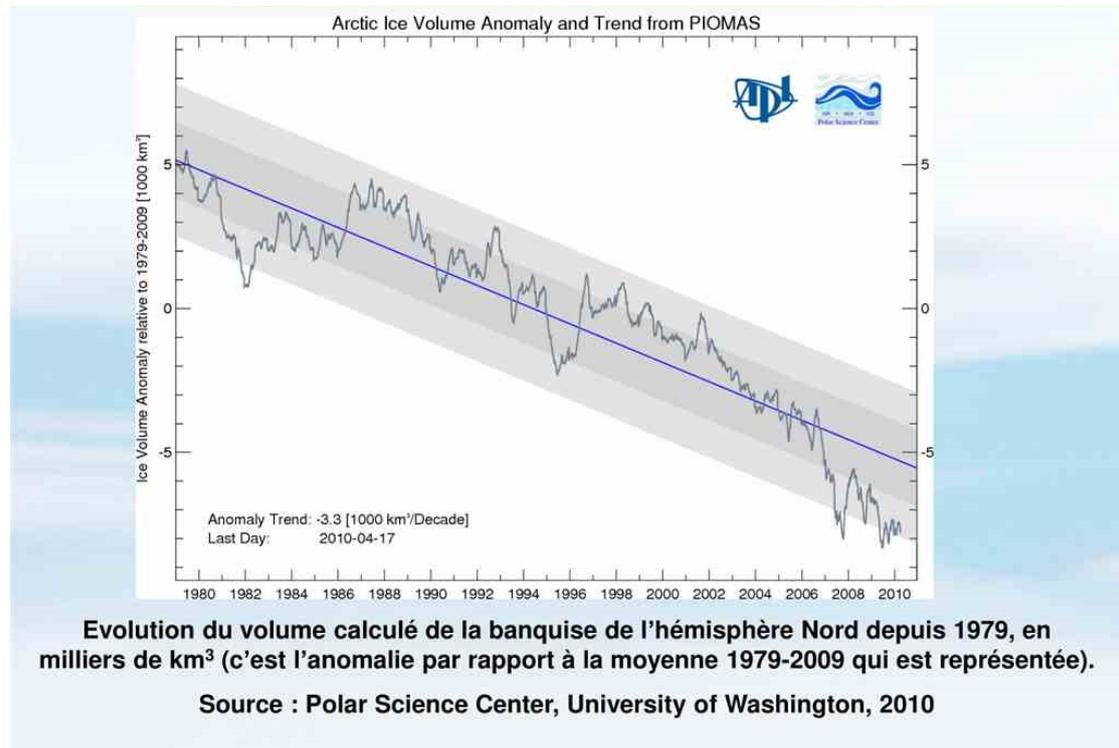
Diapositive 53.

La banquise, en l'occurrence, fond. C'est-à-dire qu'elle a tendance...

Là c'est pareil. De votre vivant, tant qu'il y aura des journaux et des gens pour en parler, eh bien régulièrement – peut-être pas tous les ans mais enfin toutes les quelques années – on vous dira : « On vient de battre le record d'étendue minimum de la banquise fin septembre. »

Parce que le processus a commencé. Et il va continuer parce que l'élévation de température est, comme je le disais tout à l'heure, plus marquée en Arctique que partout ailleurs.

53. Not Archimède again : la banquise mincit aussi



Diapositive 54.

Il y a également une diminution de l'épaisseur de la banquise qui est en cours. Donc, non seulement elle diminue en étendue, mais elle diminue en épaisseur.

Alors, on connaît l'épaisseur de la banquise depuis les années 1970. Septante, s'il y a un belge dans la salle. Est-ce que vous savez pourquoi? Qui a eu les moyens d'aller mesurer l'épaisseur de la banquise depuis les années 1970?

*** Réponse auditoire ***

Non, pas le pétrole. Pire que le pétrole. Des gens encore plus méchants que les pétroliers.

*** Réponse auditoire ***

Pas les chinois. Non, non. Les Chinois ont juste un pétrolier.

Les militaires. Quels militaires?

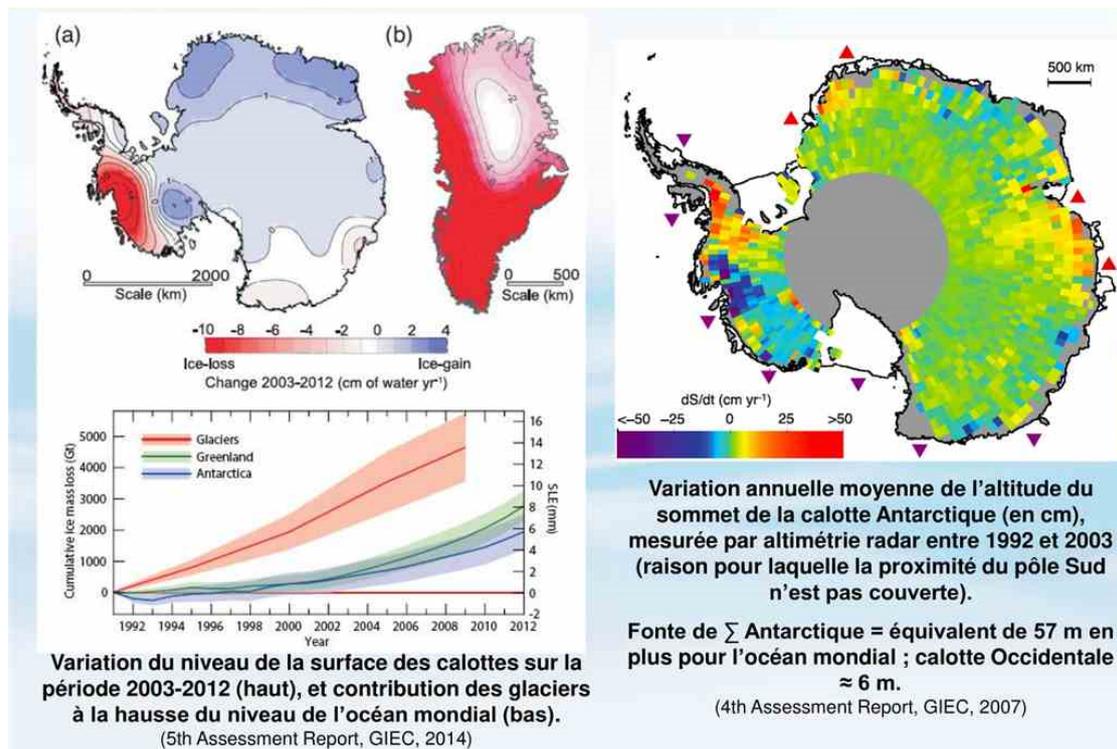
53. *NOT ARCHIMÈDE AGAIN : LA BANQUISE MINCIT AUSSI*

**** Réponse auditoire ****

Oui absolument, les sous-mariniers. Les gens qui opéraient les sous-marins lanceurs d'engins – c'est le nom poétique qu'on donne aux trucs qui ont des missiles nucléaires – mesuraient l'épaisseur de la banquise pour savoir s'ils seraient capables de faire surface à tout instant en se baladant sous la banquise. Donc ils mesurent l'épaisseur de la banquise.

On a des relevés, des séries longues, sur plusieurs dizaines d'années, sur l'épaisseur de la banquise. Donc on sait comme ça qu'elle baisse.

54. Mais beaucoup d'Archimède se profilent peut-être à l'horizon



Diapositive 55.

Mais la plus grosse surprise désagréable potentielle pour les siècles à venir, ce n'est pas de tout ça que ça va venir. C'est des calottes.

Le Groenland a commencé à fondre. On sait que le Groenland a commencé à fondre, d'abord parce qu'il y a des gens qui se baladent dessus. Et surtout parce qu'on est capable de faire de l'altimétrie radar. C'est-à-dire qu'il y a des satellites qui se baladent dans la haute atmosphère, enfin, à quelques centaines de kilomètres de la Terre, et qui mesurent avec des radars – ils font de l'altimétrie – l'épaisseur de la calotte. Si l'épaisseur de la calotte diminue, c'est que la calotte a commencé à fondre.

Une fois que la calotte a commencé à fondre, le processus s'auto-accélère. Il s'auto-accélère pour plusieurs raisons :

- La première : quand la calotte fond, son sommet perd en altitude. Si son sommet perd en altitude, il est environné d'air plus chaud, et donc ça fond encore plus vite.

54. MAIS PEUT-ÊTRE BEAUCOUP D'ARCHIMÈDE À L'HORIZON

- Le deuxième processus d'auto-entretien, c'est qu'au sommet de la calotte, vous avez des poussières qui sont amenées par le vent. Ces poussières sont absorbantes pour le rayonnement solaire. Or la neige en surface fond, mais les poussières non. Donc plus ça fond, plus la concentration en poussières augmente (puisque les poussières ont été amenées avec la neige en permanence). Donc vous vous retrouvez avec une densité de poussières en surface qui augmente, donc une surface qui absorbe plus le rayonnement solaire, et crac!, ça amplifie encore le processus.

Donc, une fois que la calotte groenlandaise... Et puis vous avez le processus de la fonte de la banquise qui élève aussi la température de manière accélérée. Donc une fois que ça a commencé, ça s'arrête plus. Donc la calotte groenlandaise est partie pour fondre, partiellement ou en totalité, dans les siècles qui viennent.

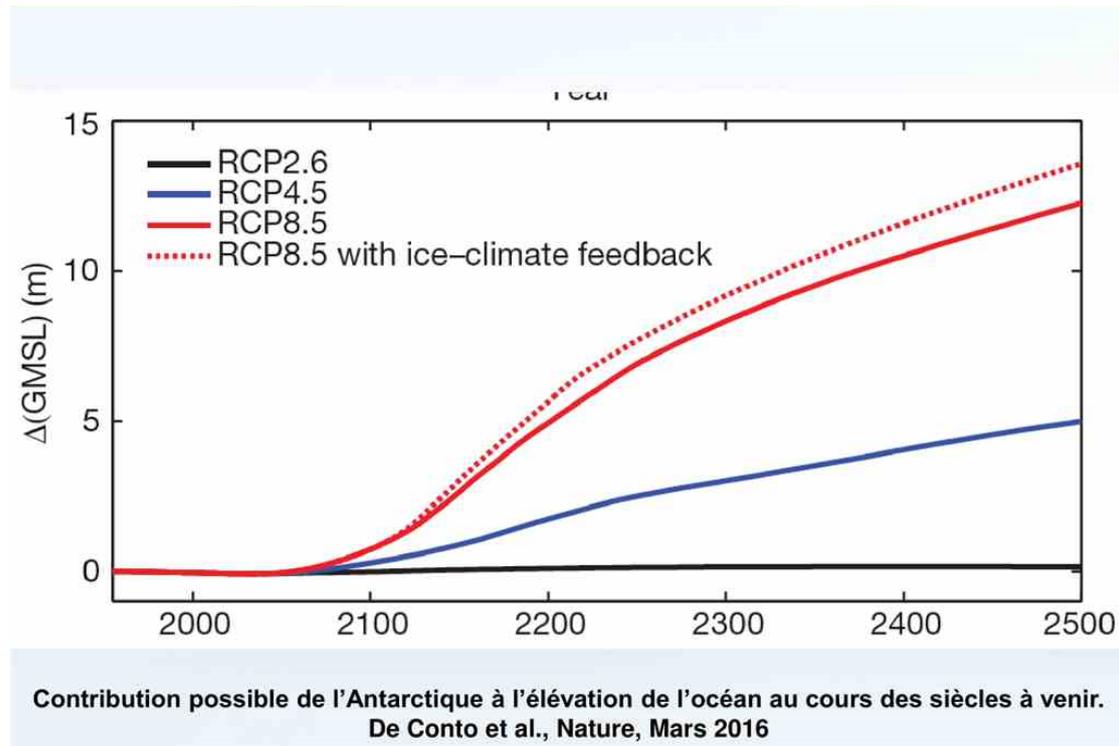
En ce qui concerne l'Antarctique, vous voyez ici... C'est le résultat d'une altimétrie radar. Et vous voyez que l'Antarctique Ouest, et en particulier cette partie-là de l'Antarctique Ouest, a commencé également à perdre du volume. Alors là, le processus qui est à l'œuvre est un peu différent.

Il se trouve que l'Antarctique Ouest repose sur un socle rocheux qui est sous-marin, et qui est déversant. C'est-à-dire que plus vous vous éloignez de la côte, et plus il est profond. À partir du moment où vous avez les langues terminales des glaciers qui commencent à se rétracter – parce que la température de la mer augmente et que la mer se soulève un peu –, vous avez un processus de déstabilisation, et de glace qui est rongée par en-dessous, qui s'accélère.

Et par ailleurs, cet Antarctique Ouest est posé sur un socle qui est en pente, et donc c'est une espèce de système d'arcs-boutants : chaque glacier, en gros, consolide les glaciers voisins. Quand vous avez les glaciers terminaux (qui sont près de la mer) qui commencent à se déstabiliser, vous avez le système d'arcs-boutants qui commence à se déstabiliser. Et donc il y a la possibilité pour l'Antarctique Ouest d'une désagrégation totale en quelques siècles, si la température monte de plus de 2 °C.

Et donc, comme la température va monter de plus de 2 °C, il est assez vraisemblable qu'on va mettre en route une désintégration partielle ou totale, là aussi, de l'Antarctique Ouest à l'échelle de quelques siècles.

55. Help!



Diapositive 56.

Ici, vous avez des simulations qui ont été faites très récemment. Ça c'est 2016.

Et vous voyez, qu'avec le scénario dans lequel on n'émet plus demain matin, tout va bien. Mais avec le scénario 4.5, qui est pourtant un scénario pas très émissif, on a déjà une contribution de l'Antarctique possible de 5 m dans les siècles qui viennent. Et avec le scénario plus émissif, on monte carrément à 12.

Alors, les 5 à 6 m, ici, à plus de 2 °C, on est raisonnablement assuré de se les prendre. Dans le même temps, on se prend 3 à 6 m en provenance du Groenland. Et dans le même temps, on se prend au moins 1 m sur la dilatation de l'eau de mer à cause de la température.

*** Question auditoire ***

Elle ne sera pas nécessairement homogène, j'y reviendrai après.

56. Gérer un port en 2478, ça risque d'être compliqué

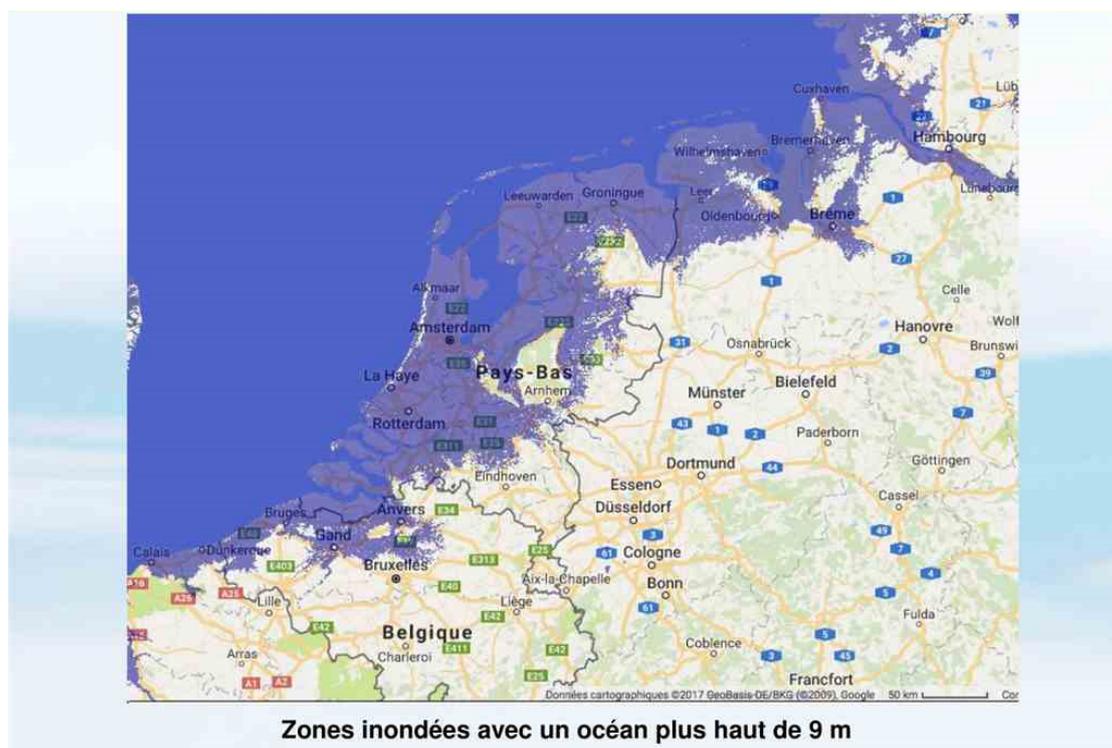


Diapositive 57.

Pour vous donner une idée de ce que ça représente, quelques mètres en plus dans l'océan mondial, vous avez ici une carte dans laquelle on a mis en bleu foncé les endroits qui sont noyés.

Donc là, vous avez Bangkok, par exemple, qui est noyé avec une élévation de 9 m du niveau de la mer.

57. Gérer un port en 2478, ça risque d'être compliqué



Diapositive 58.

Ça, c'est le nord de l'Europe.

Voilà, on parlait tout à l'heure des migrations. Vous voyez, les Flamands vont envahir les Wallons. Déjà qu'ils ne s'entendaient pas, ça ne va pas s'améliorer.

Alors, jusqu'à il y a six mois, ce qui provenait de la communauté scientifique c'était : « C'est un risque à l'horizon de quelques siècles. » Il y a maintenant trois ou quatre mois, des publications sont sorties avec des gens qui disent : « Ça pourrait aller plus vite que ce qu'on imaginait. » Alors « plus vite que ce qu'on imaginait », ce n'est pas la semaine prochaine, mais peut-être que déjà au bout d'un siècle, il va se passer des choses très significatives.

Voilà, on est rentré dans un grand point d'interrogation. La grande particularité du point d'interrogation, c'est que personne ne peut répondre. Ça veut dire que personne ne peut vous proposer une borne inférieure des emmerdements possibles. J'insiste là-dessus. Donc, la grande incertitude, j'insiste, c'est un gros risque.

57. GÉRER UN PORT EN 2478, ÇA RISQUE D'ÊTRE COMPLIQUÉ

Question : est-ce que ça va se manifester de manière continue? Réponse : Non. Vous avez aujourd'hui une idée – pour ceux d'entre vous qui sont déjà allés en Bretagne, excellente région au demeurant – vous avez l'idée de la hausse du niveau de l'eau qui est comme la marée qui monte sur la plage, d'accord? C'est un truc... C'est tout doux, tout doux, tout doux, tout doux... Puis en général vous êtes au bord de la plage quand il fait beau. Vous n'y êtes pas quand il y a une tempête et force 10. Donc, vous voyez, il fait beau, il n'y a pas trop de vent, etc. Le machin monte, monte tout doucement... Mais bon, si ça vous mouille un peu les pieds, eh bien vous reculez la serviette et tout va bien.

Alors on a tendance à oublier, dans cette image-là, que, après que l'eau soit montée, elle redescend ; qu'elle ne monte pas plus haut qu'un certain niveau ; et que ça se passe alors qu'il fait beau. Qu'il fait tout doux, etc. Et puis que ça ne concerne que du sable, puisque vous avez la laisse de haute mer, c'est encore du sable. Donc tout l'estran est couvert de sable. Et donc ça c'est une zone qui est prévue pour ça.

En ce qui concerne la montée du niveau de la mer, les choses vont se présenter de façon un peu différente. Parce que vous avez un milliard de trucs humains, qui intéressent les Hommes, qui sont construits en bord de mer.

- Vous avez les ports. En général, les ports on ne les met pas en pleine terre, c'est plus commode de les avoir en bord de mer. Sauf que les ports ne supportent pas une élévation indéfinie du niveau de la mer. Parce que si vous avez une élévation trop forte du niveau de la mer, vous noyez toutes les infrastructures qui sont installées sur les ports.
- Vous avez plein d'entrepôts. Des stocks de toute nature, des terminaux ferroviaires, etc. Ces trucs-là n'aiment pas trop être noyés par de l'eau de mer.
- Vous avez les raffineries. Parce qu'une grande partie du raffinage concerne du pétrole. Qui est amené par tankers. Et c'est plus commode d'avoir le tanker sur l'eau qu'au milieu de la Beauce. Donc les raffineries sont en bord de mer.
- Vous avez énormément de centrales électriques qui sont en bord d'eau pour le refroidissement. Par exemple, toutes les centrales électriques japonaises – pas juste nucléaires – sont en bord de mer (en première approximation).
- Vous avez des silos agricoles. Parce qu'une bonne partie du commerce des céréales se fait par vraquier. Donc les silos agricoles, vous en avez une bonne partie qui sont en bord de mer, etc.

57. GÉRER UN PORT EN 2478, ÇA RISQUE D'ÊTRE COMPLIQUÉ

Vous avez plein de trucs importants qui se trouvent en bord de mer. Et puis vous avez aussi quelques villes. Donc vous avez énormément de choses qui sont en bord de mer. Ces trucs-là sont défendus contre les agressions de la mer. Parce que de temps en temps, la mer se montre un peu méchante. Vous avez une tempête, donc une grosse dépression, donc le niveau de l'eau monte.

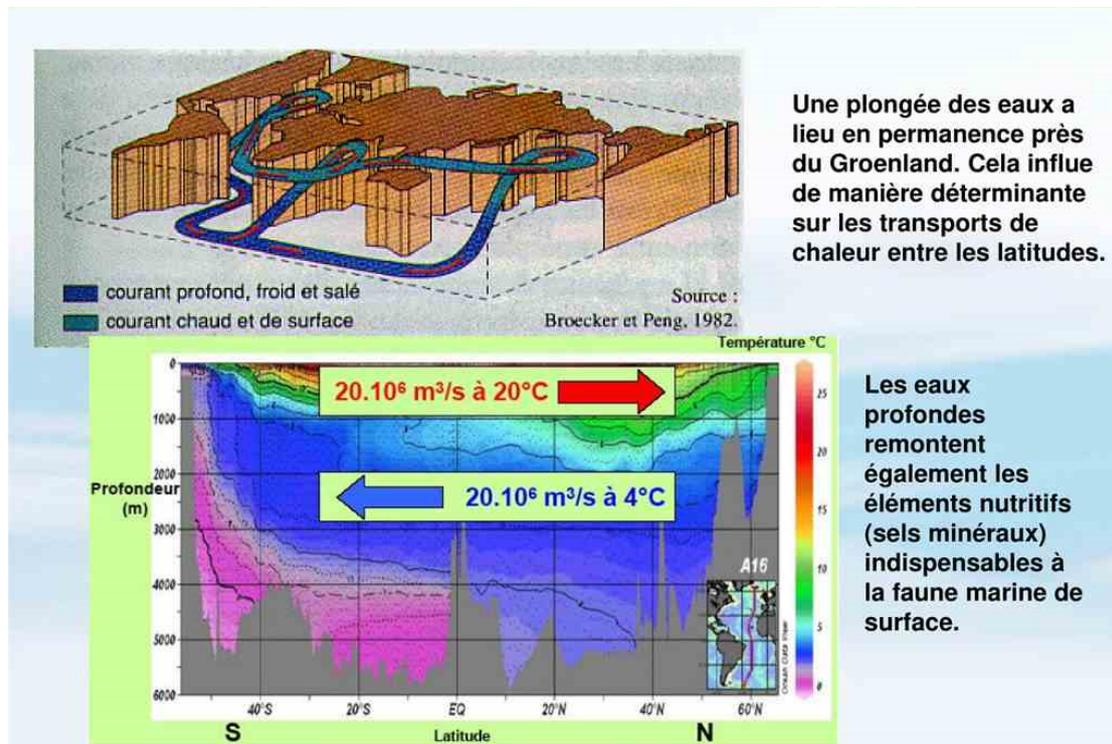
Pour ceux d'entre vous qui regardent les conséquences des tempêtes, vous avez en général ce qu'on appelle des surcotes au moment de la tempête. C'est-à-dire que le niveau de la mer monte énormément. Et ce niveau de la mer qui monte énormément peut noyer tout un tas de trucs qui se trouvent derrière.

Alors, la hausse du niveau de l'eau, qu'est ce que ça va faire? Ça va rapprocher du bord de mer toutes les infrastructures dont je viens de parler. Et c'est à l'occasion d'un phénomène extrême, comme il y en a toujours eu et comme il y en aura toujours, qu'à ce moment la mer passe par-dessus la défense et fait d'énormes dégâts derrière.

Donc la hausse du niveau de l'eau ne produira pas des conséquences de manière douce et continue. Ce n'est pas comme ça que ça va se passer. Ça va se passer à l'occasion de phénomènes discontinus, violents. C'est comme ça que les phénomènes vont se produire.

Vous avez également, sur les plaines basses, quelquefois, la conjonction d'une tempête – parce que c'est souvent l'hiver que ça se passe ces trucs-là – et d'inondations terrestres. Parce qu'il a beaucoup plu. Et à ce moment, c'est la conjonction des deux qui amène de l'eau d'un côté et de l'autre, et crac!, vous avez un processus qui est particulièrement destructeur.

58. Le jour d'Après est-il pour demain ?



Diapositive 59.

Vous avez également, dans les conséquences qui sont possibles – donc je vais venir au Groenland –, une modification de la circulation à large échelle que vous avez dans l’océan.

À cause des alizés qui poussent en permanence l’eau dans le même sens à l’équateur, et de la force de Coriolis, vous avez un grand mouvement de circulation dans les océans du globe, qui s’organise, en gros, de la manière suivante : c’est un grand mouvement Est-Ouest en surface, avec un contournement de l’Afrique par le Sud, et un grand mouvement inverse en fond avec, ici, une plongée de l’eau.

Pourquoi l’eau plonge au Sud du Groenland ? Parce qu’il se trouve que l’eau est particulièrement dense quand elle est particulièrement froide et particulièrement salée. Or, au Sud du Groenland, vous avez de l’eau qui s’est enrichie en sel. Parce qu’en remontant vers le Nord de l’Atlantique, l’évaporation a conduit, pour partie, à des précipitations qui sont allées en Europe et qui n’ont pas ruiselé au même endroit de l’Atlantique. Les fleuves mettent de l’eau douce pas à l’endroit où l’eau a perdu de l’eau douce et en se renforçant en sel.

58. LE JOUR D'APRÈS EST-IL POUR DEMAIN?

Et quand vous arrivez au Sud du Groenland – donc vous êtes dans une région à formation de banquise –, au moment où la banquise se forme... La banquise est de l'eau salée gelée, mais elle est moins salée que l'eau de mer qui lui a donné naissance. Et elle expulse de la saumure au moment où elle se forme. Donc, là, quand la banquise se forme, elle expulse de la saumure. Ce qui veut dire que l'eau qui ne gèle pas se renforce brutalement en sel.

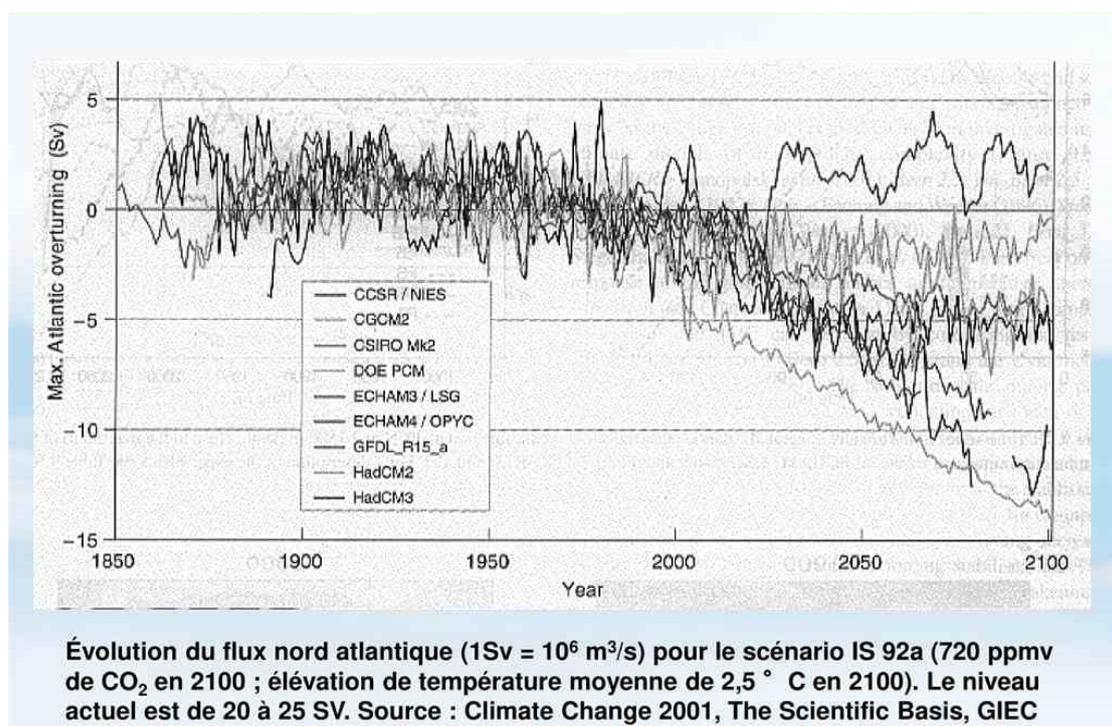
À ce moment, elle devient particulièrement froide (c'est l'hiver), particulièrement salée, et elle plonge. Elle devient plus dense que l'eau qui était en-dessous, et elle plonge. Et cette plongée des eaux profondes, c'est un mouvement descendant qui fait siphon. Et c'est à cause de ce mouvement de siphon que vous avez la dérive Nord-Atlantique qui remonte jusqu'au Sud du Groenland.

Par ailleurs comme ce mouvement enfouit la chaleur de surface, le réchauffement est moins marqué au Sud du Groenland. Parce que vous avez une pompe à chaleur qui vous prend la chaleur en surface et qui vous l'enfouit. Alors que cette pompe à chaleur n'existe pas dans le reste de l'océan. L'existence de cette pompe à chaleur – au sens premier du terme, il pompe la chaleur – explique un réchauffement qui est moins marqué, tant que cette plongée des eaux profondes a lieu.

Évidemment, si cette plongée des eaux profondes s'arrête – et ça pourrait arriver –, à ce moment, la perte de chaleur de la surface par enfouissement s'arrête également. Et alors vous n'avez plus cette singularité au Sud du Groenland.

Ça, ça vous dit la même chose, en coupe.

59. Petit coup de frein ou gros cash, là est la question



Diapositive 60.

Alors, question : est-ce que cette circulation pourrait s'affaiblir ?

La réponse est oui. Parce que dans un monde soumis au réchauffement climatique, le réchauffement des tropiques est moins important que le réchauffement de l'Arctique. Donc la différence de chaleur entre l'Arctique et les tropiques s'affaiblit. Et donc le fait que ça s'affaiblisse, ça affaiblit un peu la « différence de potentiel » entre les deux, et donc ça va affaiblir la circulation.

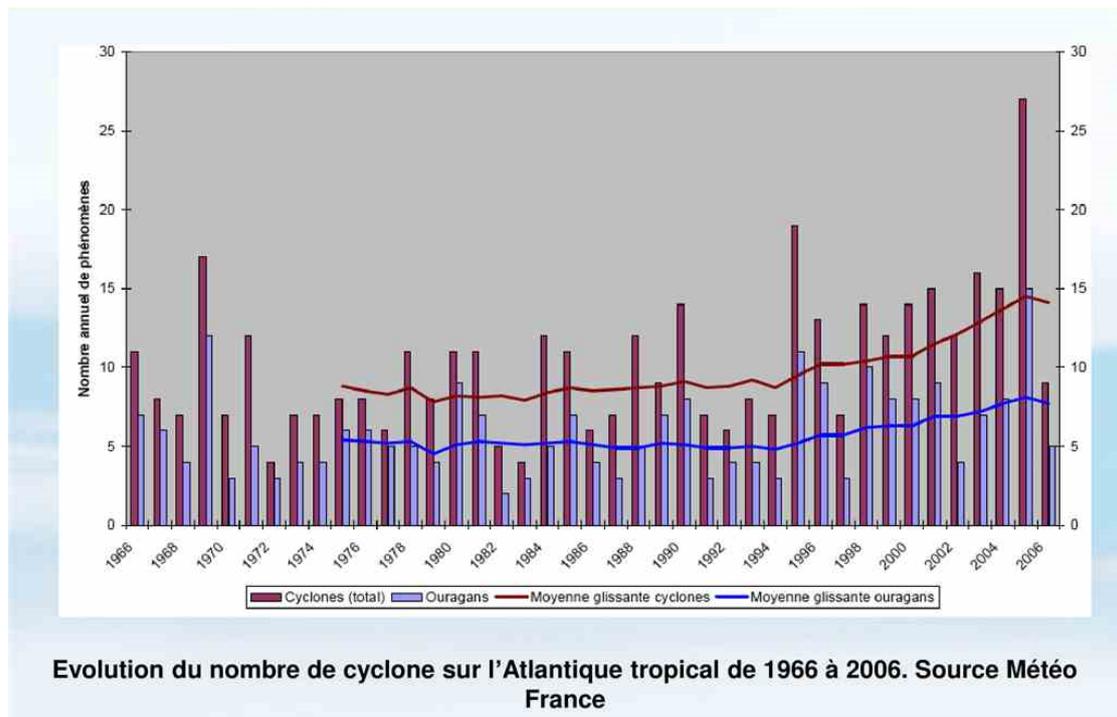
Les simulations prévoient à peu près toutes la baisse de la circulation de la dérive Nord-Atlantique. Alors, la dérive Nord-Atlantique s'exprime en Sverdrup : ce sont des millions de mètres cubes à la seconde. Pour rappel, le débit de la Seine, c'est 400 mètres cubes à la seconde. Donc on n'est pas en train de parler des mêmes ordres de grandeurs. Eh bien, il y en a beaucoup qui pensent que ça va baisser. Mais il n'y en a aucune qui pense que ça va s'arrêter brutalement.

59. *PETIT COUP DE FREIN OU GROS CASH, LÀ EST LA QUESTION*

Cela étant, il y a des épisodes dans le passé où cette circulation s'est arrêtée brutalement. En périodes glaciaires... À des moments où il y a eu des énormes débâcles d'icebergs qui ont eu lieu dans l'Atlantique Nord et qui ont amené tellement d'eau douce que l'eau n'était plus assez dense – parce qu'elle n'était plus assez salée – pour être capable de plonger. Et à ce moment, la circulation s'arrête.

Et on le constate avec des modifications très rapides – à très courte échelle – de la végétation. En retrouvant les pollens dans les sédiments (dans les carottages de sédiments près des côtes), on se rend compte que la végétation a changé du tout au tout en quelques dizaines d'années. Et c'est attribuable à une modification de cette circulation thermo-régulée.

60. Déjà plus de cyclones? P'têt ben qu'oui, p'têt ben qu'non...



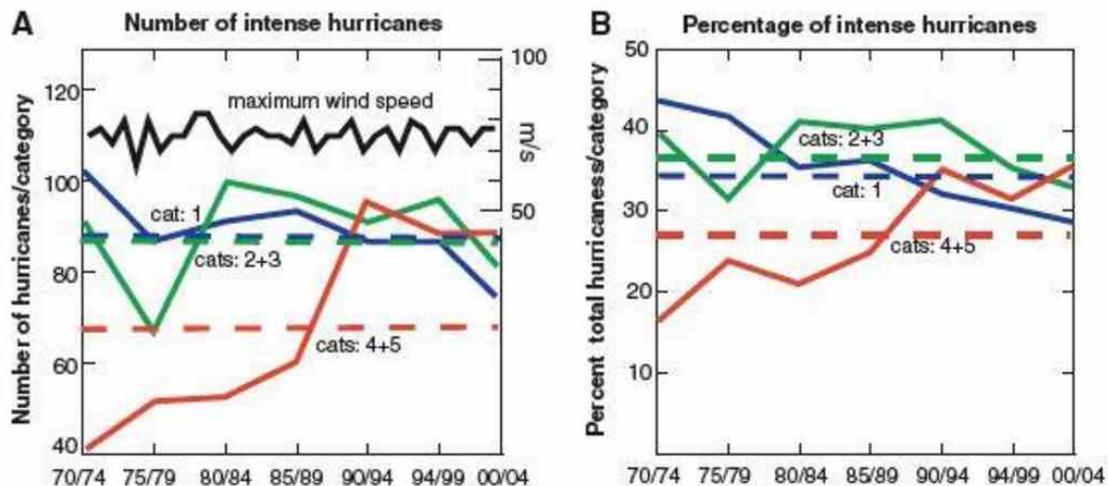
Diapositive 61.

Autre conséquence : les phénomènes extrêmes devraient s'intensifier. Et c'est un processus qui est déjà à l'œuvre.

Je disais au cours précédent : les phénomènes extrêmes sont liés à une convection entre une surface chaude et une stratosphère froide. Et avec une stratosphère qui se refroidit et une surface qui se réchauffe, et une évaporation qui augmente, vous avez globalement une pompe convective qui s'intensifie. Donc on s'attend logiquement à ce que tout ce qui est tornades, ouragans, et cyclones, augmente.

On constate, que le nombre de cyclones dans l'Atlantique Nord a une tendance à légèrement augmenter, mais surtout, leur *intensité* a tendance à fortement augmenter.

61. Une puissance cyclonique accrue? P'têt ben qu'oui...



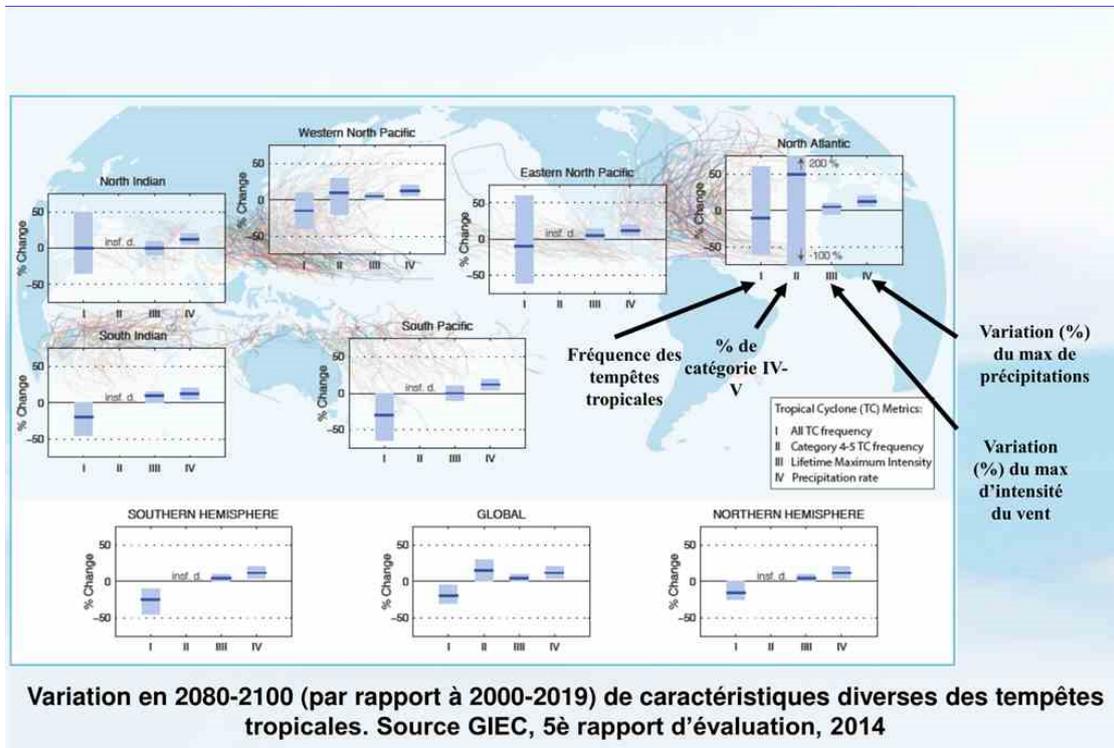
Evolution sur 30 ans du nombre de cyclone dans le monde par catégorie (gauche), et proportion de chaque catégorie dans le total (droite). Source Science, 2005

Diapositive 62.

Ici, vous avez une évolution de l'intensité des phénomènes cycloniques dans l'Atlantique. Et vous voyez que les phénomènes de catégories 4 et 5 ont considérablement augmenté sur les dernières décennies.

Dit autrement, pour le moment, il se forme *peut-être* un peu plus de cyclones qu'avant (pour être très clair). Par contre, ce qui est très clair, c'est que vous avez des cyclones plus intenses qui apparaissent. Et en fait, c'est exactement ce à quoi on s'attend pour le réchauffement futur.

62. Tourne (et monte) Marcel

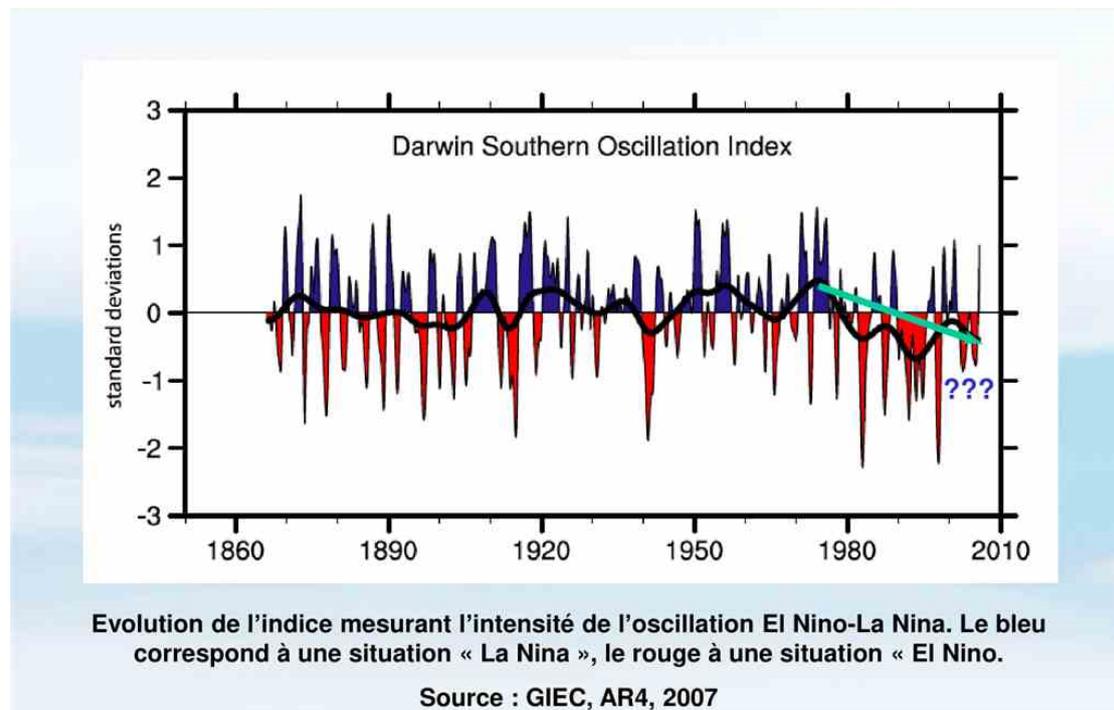


Diapositive 63.

Vous avez ici une carte. Alors c'est par bassin, puis pour l'ensemble de la planète. Mais bon je vais vous donner ça directement.

Le point important, c'est que vous voyez que les précipitations et le vent vont avoir tendance à augmenter en intensité. Donc il n'y aura pas nécessairement plus de phénomènes cycloniques, par contre, en moyenne, quand ils se formeront, ils auront tendance à être plus destructeurs.

63. Plus d'El Niño? À voir...

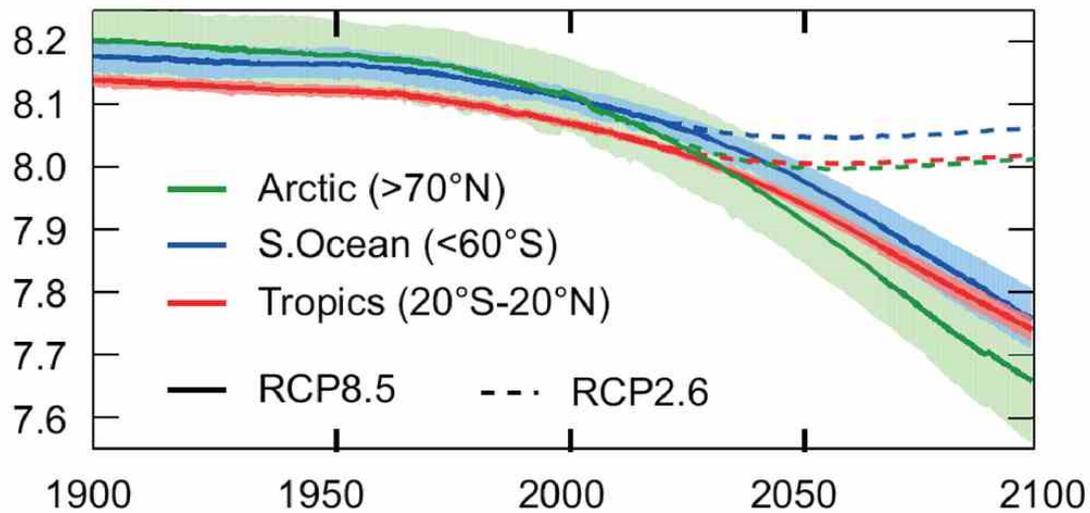


Diapositive 64.

Autre question qui est posée : va-t-on modifier l'oscillation El Niño / La Niña ? Pour le moment, la réponse n'est pas claire. Il y a un début de tendance, mais bon...

C'est une question aussi parce que ça amplifie les extrêmes décennaux. Parce que plus El Niño et La Niña sont intenses, et plus, par rapport à une tendance, vous avez des extrêmes qui sont importants.

64. Il n'est pas toujours souhaitable d'être acide



Simulation de variation du pH de l'océan d'ici 2100 en fonction du scénario.

Source IPCC, 5^e rapport d'évaluation, 2014

Diapositive 65.

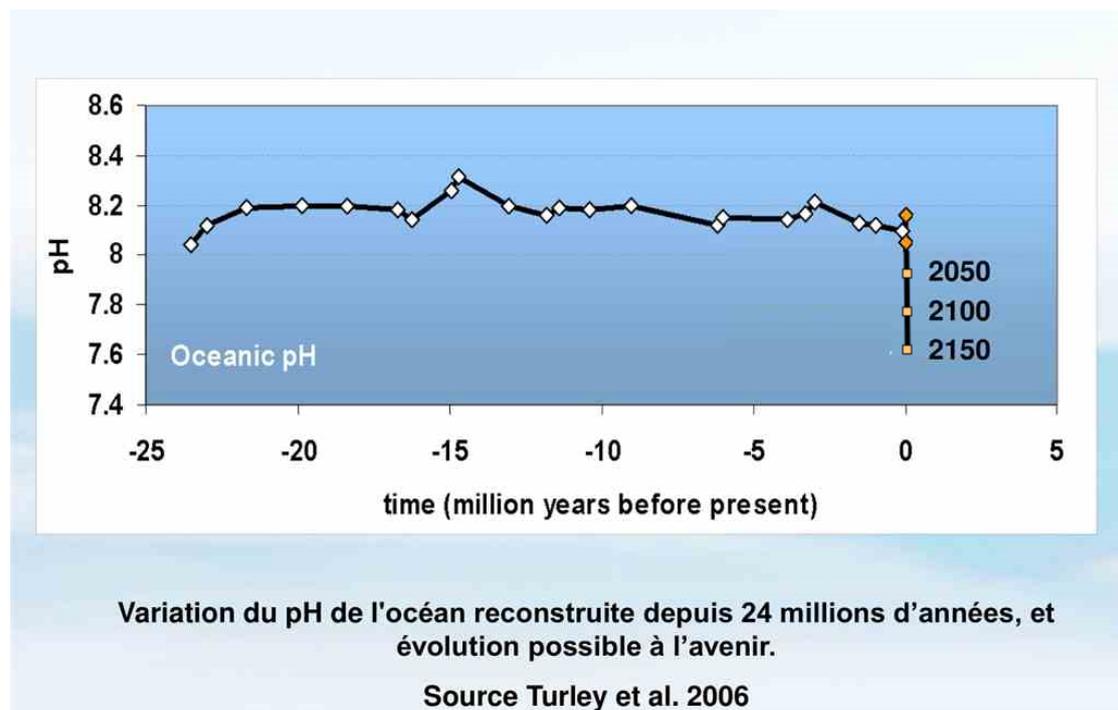
Autre conséquence de ce qui est en train de se passer : l'océan va s'acidifier.

Alors, que l'océan s'acidifie est quelque chose qui est physique. Une partie du CO_2 passe dans l'eau : c'est un équilibre de pression partielle. Une fois que le CO_2 est passé dans l'eau, il fait une réaction où il va amener de la formation d'hydrogénocarbonates (HCO_3^-) – je crois qu'on dit comme ça maintenant – et d'ions H^+ . Donc il va acidifier l'eau.

Vous savez que le CO_2 , dans les temps anciens, s'appelait l'acide carbonique. Si vous lisez les romans de Jules Verne, c'est comme ça que ça s'appelait.

Donc je mets plus de CO_2 dans l'eau, j'acidifie l'eau.

65. Le pH de l'océan, bien plus stable que tout régime politique!

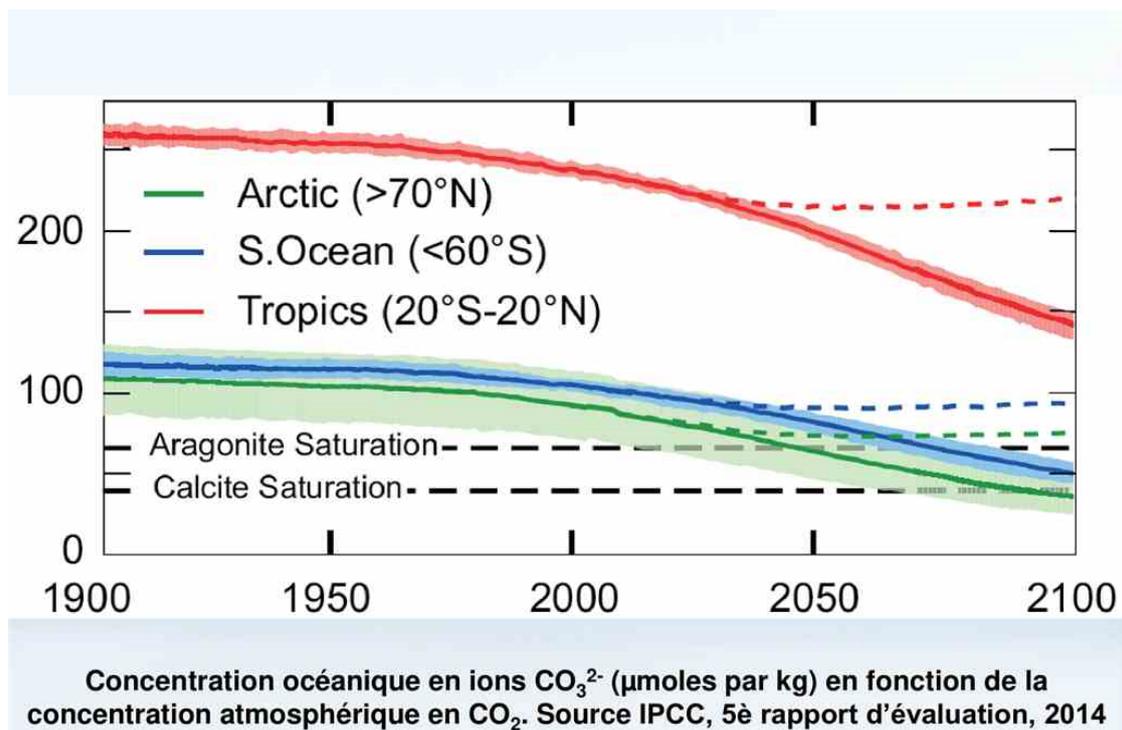


Diapositive 66.

Il se trouve que l'acidification que nous nous apprêtons à faire est quelque chose qui, là aussi, est extrêmement disruptif par rapport à ce qu'a été le pH de l'océan – au moins sur les 25 dernières millions d'années – qui était remarquablement stable.

Et ici, vous voyez comment peut évoluer le pH à des horizons de temps très, très court par rapport aux échelles géologiques.

66. Moins de calcaire produit = pas de pot pour les coraux



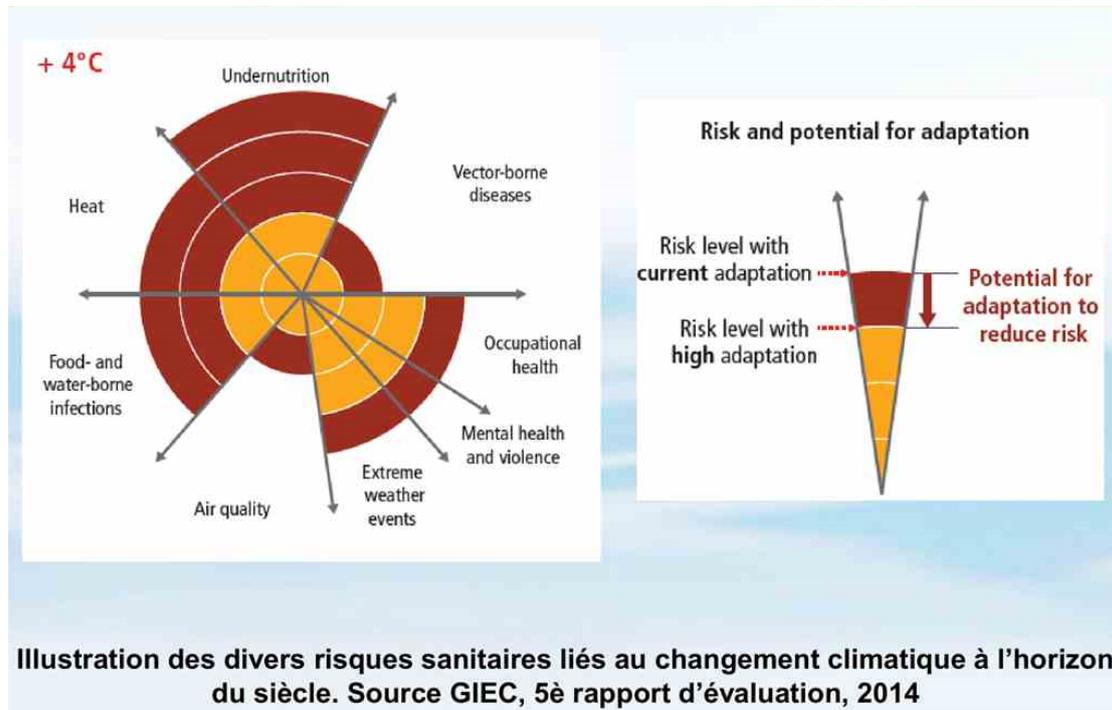
Diapositive 67.

Évidemment il y a un certain nombre d'animaux dans l'océan qui sont habitués à ce pH très stable, à commencer par les coraux. Mais également à commencer par un certain nombre d'espèces qui ont besoin de synthétiser du calcaire, et notamment de l'aragonite.

L'aragonite est une forme de calcaire. Vous avez deux formes : la calcite et l'aragonite – qui est synthétisée par un certain nombre d'espèces planctoniques qui se font des petites coquilles.

Eh bien, si elles ne sont plus capables de se faire ces petites coquilles, ces espèces disparaissent : elles meurent. Donc une partie du plancton est à risque dans cette histoire-là.

67. S'adaptera, s'adaptera pas?



Diapositive 68.

Alors en bout de chaîne, il y a nous.

Ce graphique est là pour rappeler que les risques pour la santé, c'est-à-dire les risques pour l'espèce humaine, ils viennent à la fois de choses que nous avons déjà vues jusqu'à maintenant... Encore une fois, si on ne mange pas, on n'est pas bien... Mais après ils peuvent venir de risques indirects.

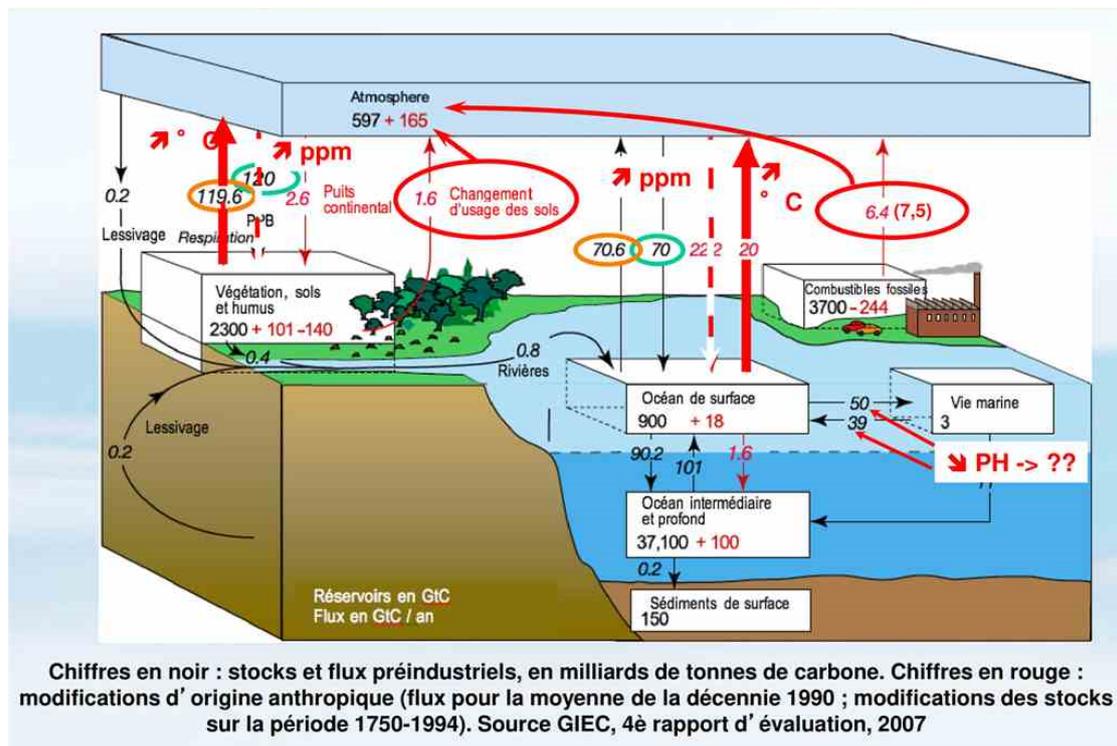
C'est-à-dire : si c'est le voisin qui ne mange pas, et le voisin commence à se mettre dans un état de guerre, ensuite le voisin arrive chez nous. Nous, on peut avoir à manger, on va quand même être à risque à cause du changement climatique. Parce qu'on va avoir une conséquence qui n'est pas une conséquence physique directe, mais qui est une conséquence géopolitique.

Je ne crois pas qu'il existe un logiciel fiable de prévision des guerres, d'accord? En tout cas, à moyen et long termes, je ne pense pas que ce soit très simple. Par contre, quelque chose qui est raisonnablement robuste comme conclusion, c'est qu'à partir du moment où vous avez une mise sous tension globale du système – c'est-à-dire que vous avez, comme dans la tectonique des plaques,

67. *S'ADAPTERA, S'ADAPTERA PAS?*

des gens qui sont globalement sous stress de façon croissante à la surface de la planète –, ce n'est pas très difficile de comprendre que globalement, les situations conflictuelles vont augmenter. Pas très difficile de comprendre que ça va être globalement le cas.

68. Plus de CO₂ = plus chaud, mais l'inverse est vrai aussi!



Diapositive 69.

Dernier point : je vais vous montrer maintenant l'asservissement du cycle du carbone et du climat, qui est une chose importante dans ce qui nous concerne.

Vous avez ici un diagramme qui représente les flux et les stocks de carbone sur Terre. Avec en noir la situation telle qu'elle se présentait avant que les Hommes ne fassent quelque chose au climat, et en rouge les modifications qui sont intervenues au milieu des années 1990 par rapport à la situation pré-industrielle.

Ce graphique vous dit que, par exemple, en situation pré-industrielle, l'océan échange du carbone avec l'atmosphère. Pourquoi? Parce qu'il se trouve que la capacité à dissoudre du CO₂ de l'eau de mer est plus élevée quand l'eau est froide. Donc partout à la surface de la Terre où vous avez des courants qui refroidissent l'eau, vous avez un flux descendant de CO₂.

68. PLUS DE CO₂ = PLUS CHAUD, MAIS L'INVERSE EST VRAI AUSSI!

Donc par exemple, le Gulf Stream est une pompe à CO₂... Enfin, la dérive Nord-Atlantique plus exactement, est une pompe à CO₂. L'eau se refroidit en montant vers le Groenland : elle pompe du CO₂. À l'inverse, le courant du Labrador, qui est un courant qui vient du Nord, froid, et dont l'eau se réchauffe en descendant vers le Sud, c'est un émetteur de CO₂. Évidemment : le CO₂ qui a été absorbé à un moment est réémis à un autre, le système s'équilibre.

Vous avez un deuxième flux naturel de CO₂ entre l'atmosphère et les terres émergées, qui est le cycle de la végétation. Pour croître, les plantes prennent du carbone dans l'atmosphère sous forme de CO₂. Mais derrière, les plantes sont mangées soit par des animaux macroscopiques (vous par exemple), soit par des animaux microscopiques (c'est la décomposition des végétaux morts). Et à ce moment, la respiration restitue ce CO₂ à l'atmosphère. Et dans la respiration, vous avez évidemment la respiration des micro-organismes.

Vous constatez que, avant que l'on tripote le système, les flux sont globalement équilibrés. Donc vous faites ça et ça, et ça et ça, et le « run-off » ici, et clac!, c'est équilibré. « Run-off », c'est le lessivage par les eaux de pluie.

Et puis arrivent les hommes et femmes.

Alors, qu'est ce qu'on fait, nous? On va faire deux choses : on va déforester et on va déstocker des combustibles fossiles. Dans les deux cas de figure, on va prendre du carbone qui était dans un stock (la végétation ou les combustibles fossiles) et le coller dans l'atmosphère. Ce faisant, on augmente la quantité de CO₂ dans l'atmosphère. Donc on augmente la température de l'atmosphère.

À ce moment, comme la température augmente, l'eau en surface se réchauffe. Et ça, toutes choses égales par ailleurs, ça envoie plus de CO₂ dans l'air. C'est le processus dont je vous avais parlé au moment de la variation naturelle du climat, en disant : quand ce sont les paramètres astronomiques qui réchauffent le climat, ça vous envoie du CO₂ dans l'air et ça amplifie le processus.

Mais dans le même temps, comme vous avez plus de CO₂ dans l'atmosphère que dans l'océan, en pression partielle, vous allez créer un flux descendant de CO₂ de l'atmosphère vers l'océan. Alors il se trouve que, « coup de chance », actuellement, les deux sont à peu près équilibrés. Mais c'est un coup de chance, parce que l'un vient d'une différence de pression partielle, l'autre vient d'une variation de température.

En ce qui concerne les terres émergées, dans un premier temps, plus de CO₂ dans l'air : c'est plus de nourriture pour les plantes. Donc les plantes ont tendance à accroître la photosynthèse. C'est comme ça qu'on accélère le métabolisme des plants de tomates dans les serres nantaises : c'est en enrichissant

68. *PLUS DE CO₂ = PLUS CHAUD, MAIS L'INVERSE EST VRAI AUSSI!*

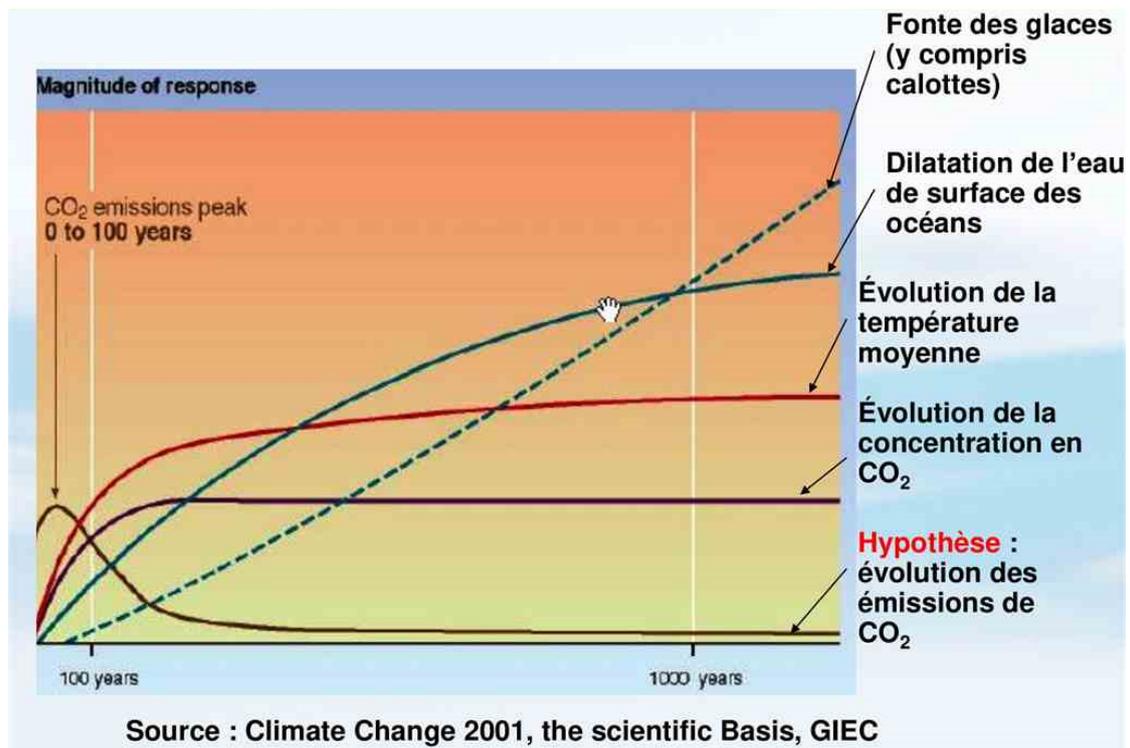
l'atmosphère en CO₂. Grâce à quoi un kilo de tomates de serre nantaise, c'est quasiment un kilo de gaz.

Mais dans le même temps, vous avez une augmentation de la température qui favorise le métabolisme microbien. Donc la respiration des microbes. Donc l'émission de CO₂ par les terres émergées. Mais avec le temps, il se trouve que l'augmentation de température va s'intensifier après que le CO₂ s'arrête d'augmenter. Et à ce moment, vous allez avoir une intensification de l'émission de carbone par les sols. Vous allez avoir un affaiblissement de la photosynthèse – parce que les écosystèmes vont de plus en plus mal supporter l'élévation de température et le stress hydrique.

Et en ce qui concerne l'océan, vous allez avoir une intensification du CO₂ rejeté par l'eau dans le même temps que les pressions partielles vont finir par s'équilibrer, et donc que le flux descendant va se calmer.

Donc je suis en train de vous montrer qu'ici vous avez un ensemble de rétroactions positives, vous voyez, qui font que le système a malheureusement une capacité à s'emballer à cause de la rétroaction du climat sur le cycle du carbone. Alors, ça finira toujours par s'amortir. Ça finira toujours par trouver un point d'équilibre. Mais, malheureusement, le point d'équilibre est susceptible d'être trouvé beaucoup plus haut.

69. Au secours! Où est le bouton « reset »?



Diapositive 70.

Et je vais finir avec les échelles de temps caractéristiques de cette affaire. Vous avez ici une mise en perspective de la façon dont les divers processus dont je vous ai parlé vont s'échelonner dans le temps, en ce qui concerne cette affaire.

Donc, vous avez ici la manière dont les émissions de CO₂ vont évoluer. Vous voyez, elles augmentent. Et puis, au plus tard à cause de la limitation géologique des stocks de combustibles fossiles, ça passe par un maximum, et ça décroît. Je dis bien : *au plus tard* à cause de ça. Ça peut décroître plus tôt. Il faut l'espérer si toutes les conséquences que je viens d'évoquer ne semblent pas suffisamment appétissantes pour que l'on décide que le jeu en vaut la chandelle.

À cause de l'inertie chimique... Le CO₂ est un oxyde, donc chimiquement stable. À cause de l'inertie chimique du CO₂ dans l'atmosphère, vous voyez que ce n'est pas au moment où on passe le maximum des émissions que l'on passe le maximum de la concentration. Donc au moment où les émissions commencent à baisser, c'est-à-dire au moment où soit vous êtes en stress énergétique, soit on a commencé à faire des efforts d'un côté ou de l'autre, de toute façon, la

69. AU SECOURS! OÙ EST LE BOUTON « RESET »?

première chose que les gens vont voir, c'est que la concentration va continuer d'augmenter.

C'est compliqué comme situation. C'est-à-dire, vous vous dites : « Merde! Ou bien on est de plus en plus mal et on voit que la concentration augmente quand même – parce qu'on n'a plus assez d'énergie. Ou bien on va commencer à faire des efforts et ce qu'on voit c'est que la concentration augmente quand même. » Dans tous les cas de figure ça va être une situation un peu compliquée à expliquer.

La température va continuer à dériver longtemps après que l'on aura passé le maximum d'émissions. Très longtemps après que l'on aura passé le maximum des émissions.

Et enfin, en ce qui concerne la réponse des océans et de la cryosphère, là les conséquences vont s'échelonner pendant des milliers d'années après que nous aurons passé le maximum des émissions.

Alors je répète ce que j'ai dit au moment où j'ai parlé de l'inertie chimique du CO₂ dans l'air : en fait le changement climatique est un système dans lequel il n'y a pas de possibilité de guérir. On peut prévenir, on peut s'adapter : on ne peut pas guérir. Au sens où on ne peut pas supprimer la cause de la maladie. C'est ça qu'il faut avoir présent en tête.

70. Quelques éléments de conclusion

La connaissance des risques **restera** toujours partielle. Il faut faire avec.

Attention à ne pas confondre conditionnels et futurs simples : tout ce qui est possible n'arrivera pas nécessairement, mais plus nous émettons, et plus le risque est sérieux.

Attention aussi à ne pas confondre « ignorance » et « garantie qu'il ne se passera rien » ! **L'ignorance n'est pas une police d'assurance.**

Attention enfin à **ne pas raisonner à capacité de réaction constante** : ce qui fait notre capacité de résistance à l'adversité aujourd'hui, c'est essentiellement l'abondance de l'énergie, et ce qu'il restera de cette abondance dans un siècle est un énorme point d'interrogation.

Diapositive 71.

Donc ce que je redis – même si ce n'est pas extrêmement sympathique pour la génération que vous représentez –, c'est que :

- C'est un processus qui va malheureusement ne faire que croître et embellir jusqu'à ce que je meure et jusqu'à ce que vous mourriez. Quoi qu'on fasse de toute façon.
- On travaille pour ses enfants en ce qui concerne l'amortissement des conséquences. Mais c'est à cette échelle là que ça se passe.
- Il faut se garder de penser que ce qu'on ne connaît pas est une absence de risque. Parce qu'en général, c'est comme ça qu'on raisonne. Malheureusement, ce n'est pas comme ça qu'il faut raisonner en l'espèce.
- Et enfin, la dernière phrase reboucle avec le premier cours, et elle est absolument essentielle : une partie significative de votre vie va se passer dans un monde dans lequel l'accès à l'énergie deviendra un problème croissant pour une quantité croissante de zones dans le monde. Ce qui veut dire que

70. QUELQUES ÉLÉMENTS DE CONCLUSION

la capacité de réponse au problème va avoir tendance à s'affaiblir avec le temps.

C'est une autre manière de dire qu'on devrait affecter nos moyens à s'occuper du problème tant qu'on en a encore, au lieu de penser que le temps joue pour nous, et que demain on aura des drones, des robots et Dieu sait quoi d'artificiel qui permettra de gérer le problème beaucoup plus facilement qu'aujourd'hui.

En fait, comme c'est l'énergie qui est au premier ordre le proxy de notre capacité à gérer n'importe quoi, si on en a moins, ce n'est pas, malheureusement, essentiellement des trouvailles techniques qui vont permettre de compenser ça au premier ordre. Ça ne marchera pas bien.

Voilà, à la prochaine fois.

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.