

IV - LE CHANGEMENT CLIMATIQUE 2/2



Chapitre 18 - L'action des aérosols et précurseurs d'aérosols

▶ <https://youtu.be/RQkLWcGWy1o>

Chapitre 19 - La logique d'une simulation climatique du GIEC

▶ <https://youtu.be/16ZzT05czZU>

Chapitre 20 - Les scénarii du GIEC

▶ https://youtu.be/d_BEsUQWmco

Chapitre 21 - Comparaisons avec les changements de températures passés

▶ <https://youtu.be/FoCHP0lcJeo>

Chapitre 22 - Les impacts du changement climatique

▶ <https://youtu.be/TDHkU69ppD0>

A / L'augmentation de la température de l'atmosphère et de l'océan

B / La variation des précipitations

C / Impacts du changement climatique sur les écosystèmes

D / Les impacts du changement climatique : santé humaine

E / Les impacts du changement climatique : la montée des océans

F / Impact du réchauffement climatique sur la circulation des courants océaniques

G / Impact du changement climatique sur l'intensification des phénomènes météorologiques extrêmes

H / Impact du changement climatique : l'acidification des océans

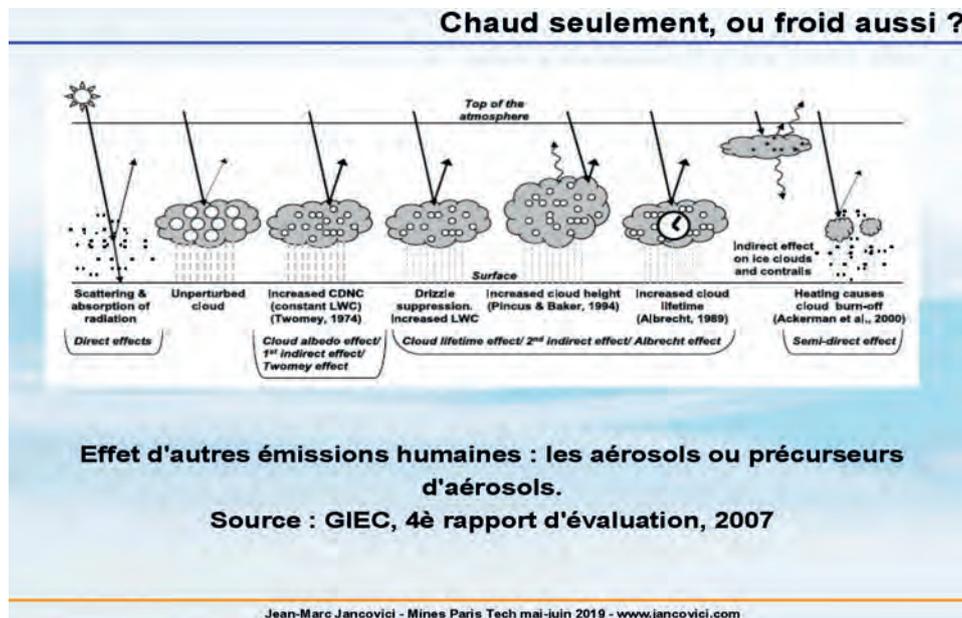
I / Impact du changement climatique pour l'espèce humaine

Chapitre 23 - Les rétroactions positives du système climatique

▶ <https://youtu.be/Ti8NNntkqx8>

Chapitre 18 - L'action des aérosols et précurseurs d'aérosols

Pour finir le tour d'horizon des émissions humaines responsables du dérèglement climatique.



Les aérosols et les précurseurs d'aérosols sont à l'instar des gaz à effet de serre :

- des substances mises dans l'atmosphère du fait de l'activité humaine
- qui contribuent au réchauffement climatique

Un aérosol est une suspension dans l'air de particules solides ou liquides. L'activité humaine :

- soit émet directement des particules dans l'atmosphère (par exemple la suie, suspension dans l'air de particule de carbone)
- soit en émettant des substances / des gaz qui une fois dans l'air vont émettre des particules solides ou liquides (exemple très important, le dioxyde de soufre SO_2)

Exemple de l'aérosol dioxyde soufre

Une fois dans l'atmosphère, le SO_2 va créer des particules de sulfates, c'est-à-dire des particules brillantes et donc particulièrement réfléchissantes pour la lumière solaire. Le carburant particulièrement soufré utilisé dans la marine marchande :

- ont à court terme un effet "bénéfique" refroidissant plus important que l'effet réchauffant
- mais à long terme les particules reviennent dans les précipitations sous forme de pluies acides (le sulfate se dissout dans l'eau qui au sol devient de l'acide sulfurique)

Les aérosols agissent sur la formation des nuages :

- ils servent de noyau de nucléation
- et favorisant la condensation de la vapeur d'eau

Le constat a été fait qu'au-dessus des zones très industrialisées, les nuages sont formés :

- de particules un peu plus fines
- et qui précipitent un peu moins facilement

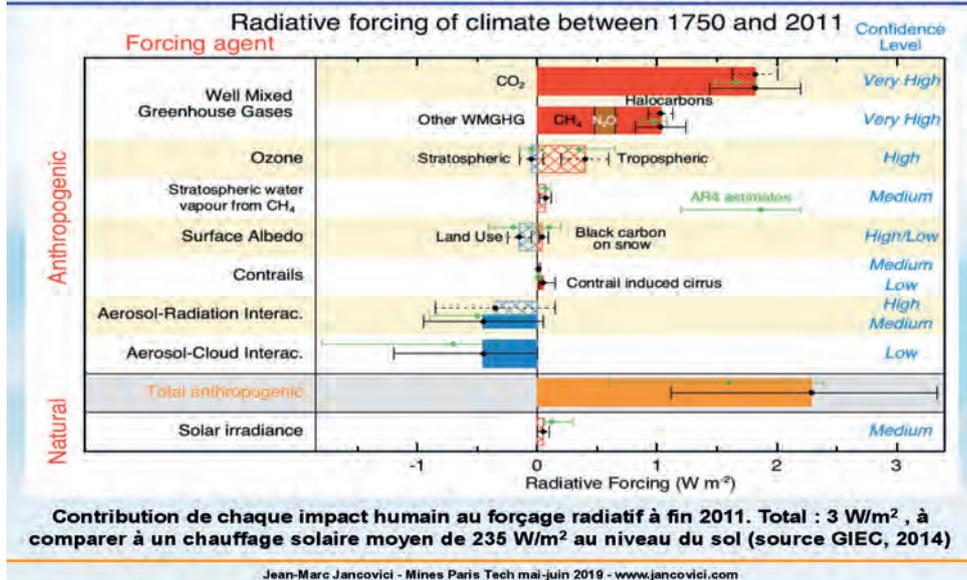
Les émissions humaines d'aérosols peuvent ainsi modifier la nature des nuages :

- lorsque les particules sont sombres (exemple la suie), cela intensifie le réchauffement car cela augmente la quantité de rayonnement solaire absorbé
- lorsque les particules sont brillantes (exemple SO_2), cela augmente l'albédo, et donc diminuer la quantité de rayonnement absorbé

Caractéristiques des aérosols :

- En fonction de la nature de l'aérosol envoyé dans l'atmosphère : effet réchauffant ou effet refroidissant (le plus souvent)
- Durée de vie courte

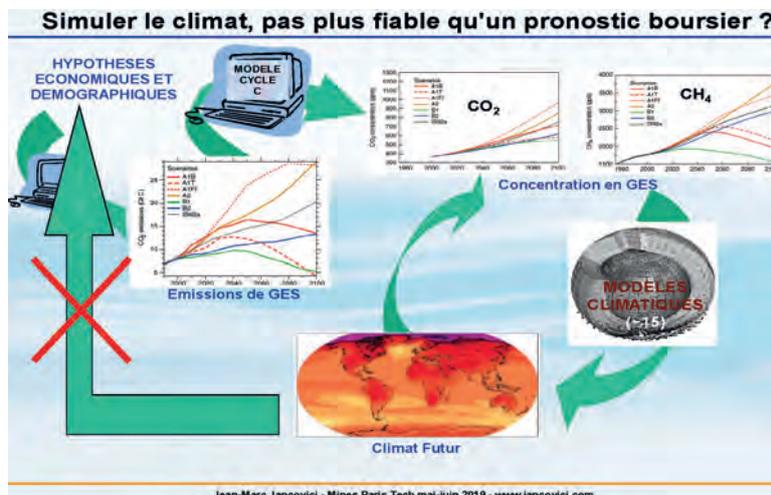
Les gaz chauffent ; les aérosols refroidissent... quel bilan ?



Bilan des effets refroidissants et réchauffants de toutes les substances émises par l'activité humaine :

- il y a bien un effet de forçage radiatif du fait de l'activité humaine
- les aérosols - dont le poids relatif reste difficile à évaluer pour certains - ne compensent jamais le forçage

Chapitre 19 - La logique d'une simulation climatique du GIEC



En entrée de la simulation :

- la représentation du système physique, c'est-à-dire un Modèle de climat
- l'hypothèse avec laquelle le chercheur va venir perturber ce système physique, en l'occurrence les émissions de GES

Les premières présentations des rapports du GIEC consistaient à :

1. Elaborer des hypothèses sur les émissions futures de GES

Ces hypothèses des émissions des GES sont élaborées en fonction d'hypothèses secondaires liées à l'activité économique, à la croissance de la population, etc.

> dans cette approche, les émissions de GES résultent de l'économie, consommatrice d'énergie

> c'est si on y réfléchit, une inversion de causalité puisque c'est la disponibilité d'énergie qui commande à l'activité économique. Cette approche inverse le facteur limitant.

2. Modéliser l'évolution de la concentration future de GES

Une fois les différentes hypothèses d'émissions futures de GES élaborées, elles sont intégrées dans une modélisation consistant à déterminer le niveau de concentration de GES dans l'atmosphère (unité de mesure, le RCP : Representative Concentration Pathway)

3. Modélisation du climat résultant de la concentration future de de GES

Le modèle du climat ainsi obtenu va décrire les effets selon les hypothèses concentration de GES. Désormais dans les Rapports du GIEC, il y a une prise en compte de la rétroaction :

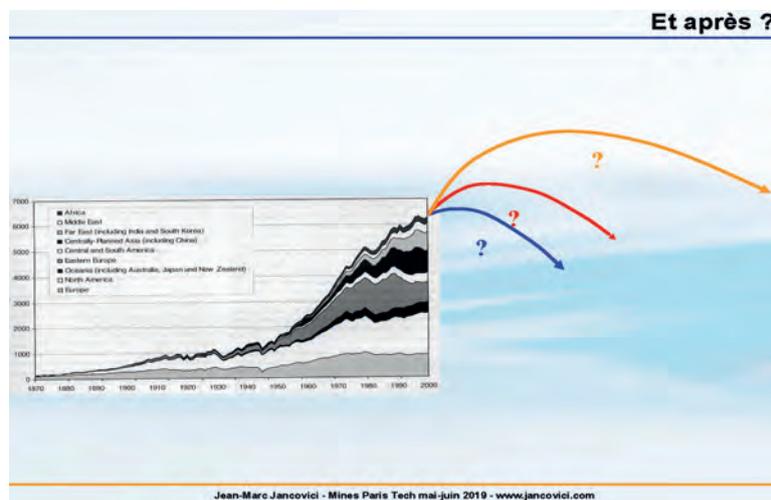
- entre la concentration de GES
- et le modèle de climat

Exemple : si le réchauffement est trop brutal, les écosystèmes se détériorent et une partie des puits de CO2 ne sont plus efficients (moins de photosynthèse, CO2 moins recyclé par le vivant et par conséquent, à émission identique la concentration de CO2 augmente plus vite)

Cependant la rétroaction avec les hypothèses initiales ne sont toujours pas prise en compte, dit autrement une décroissance subie du fait de la brutalité / rapidité du changement climatique n'est pas anticipée.

On a finalement un paradoxe dans les scénarios du GIEC :

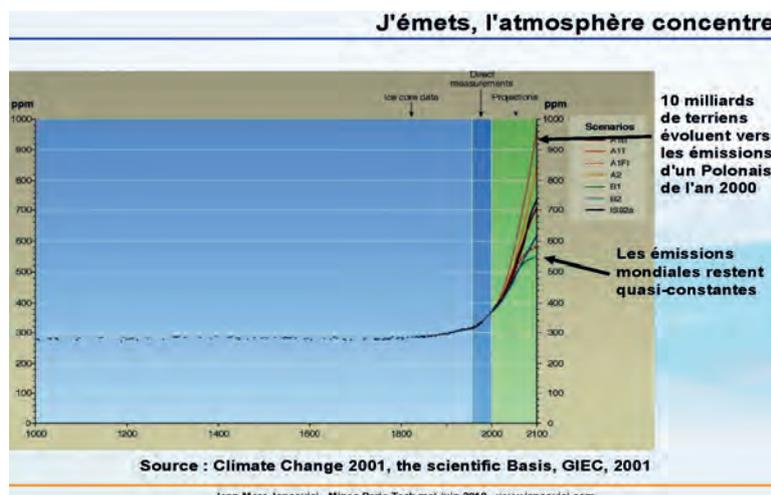
- une causalité valide : les scénarios les plus sombres sont ceux où la concentration de GES est la plus im- portante
- mais une déduction finale fragile : plus le scénario est catastrophique, mieux l'économie se porte. Par construction, dans les scenarii du GIEC, jamais le climat ne peut porter atteinte au système économique.



Impossible de prédire ce que seront les émissions futures de GES :

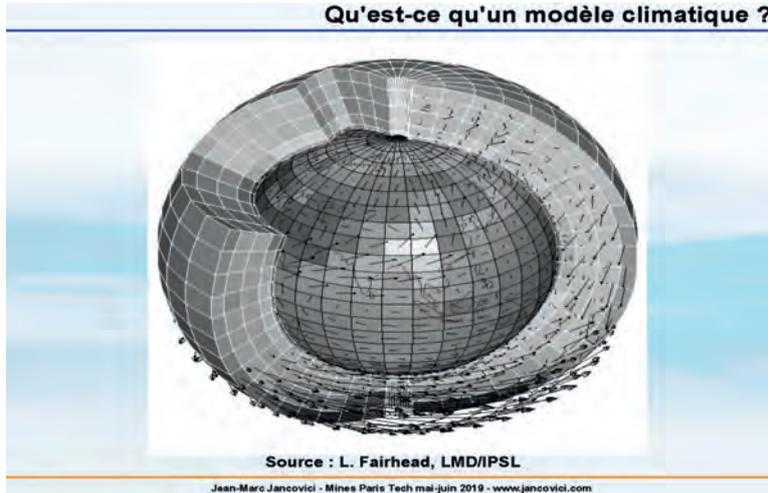
- combien d'êtres humains peupleront la terre dans 40 ans ?
- combien de pétrole, de gaz et de charbon par personne dans le futur ?
- combien de kilo de viande consommés par personne ?
- etc.

Les prédictions étant impossibles, les chercheurs élaborent des scénarios, proposent plusieurs possibilités.



Première étape de la modélisation : passer des émissions à la concentration de GES (ci-dessus CO2)

Qu'est-ce qu'un modèle climatique ?

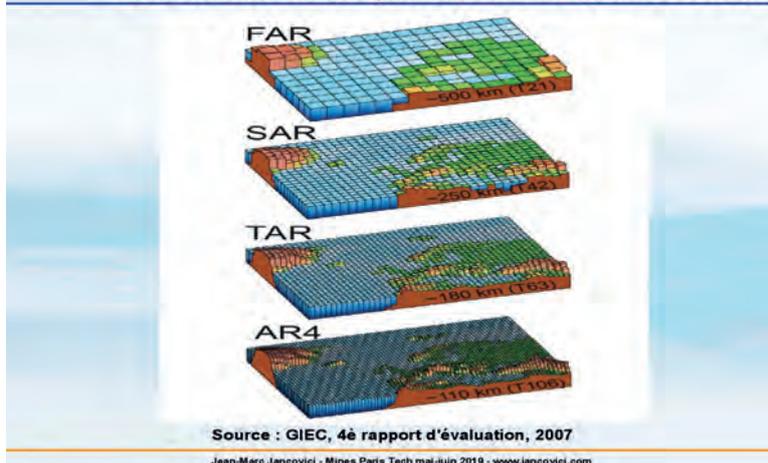


Deuxième étape : une fois les scénarios des concentrations mis au point, les chercheurs les intègrent dans un modèle de climat.

Un modèle de climat est une représentation numérique / virtuelle de la planète conçu :

- en maillant tous les compartiments fluides des océans et de l'atmosphère
- ainsi que les continents
- en distinguant les propriétés de l'eau et de la terre

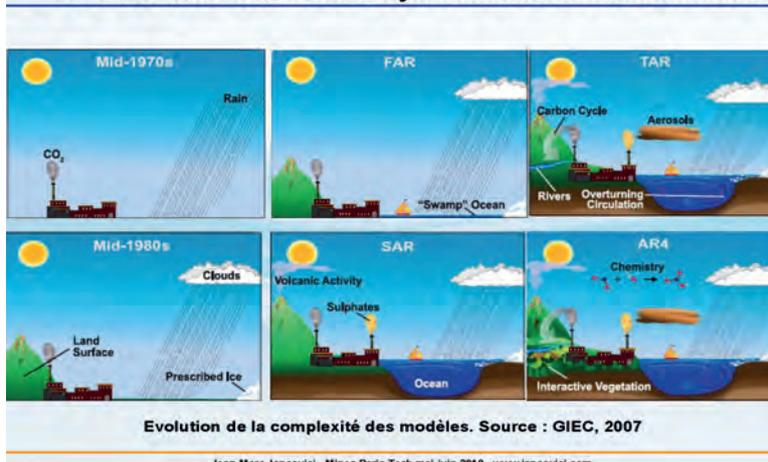
Amélioration en complexité, mais aussi en résolution



Les modèles s'améliorent avec les capacités des calculs informatiques accrues

- les mailles ont pu être resserrées
- le relief a été pris en compte (permettant de savoir si la place occupée par l'atmosphère)
- en plus de l'albédo de la surface terrestre a pu être pris en compte le cycle du carbone

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



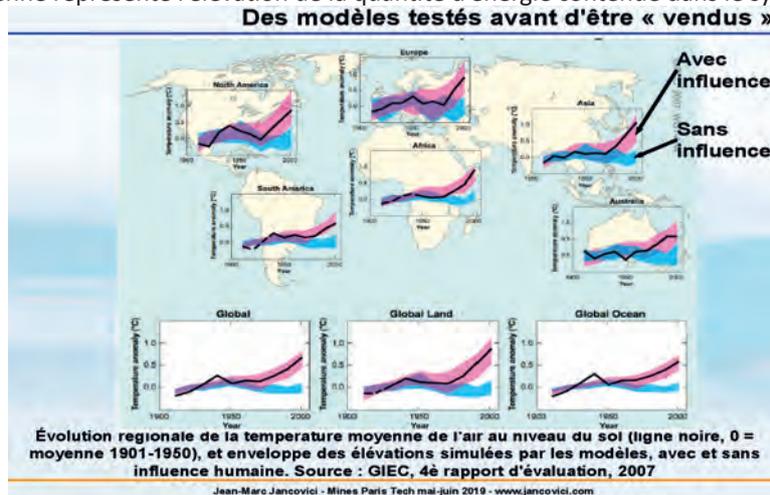
Autre champ d'amélioration du modèle : la complexité des processus impliquant l'atmosphère (océans,

végétations, aérosols, couverture nuageuse, chimie atmosphérique, cycle du carbone...)

A noter : l'amélioration des modèles n'a jamais changé fondamentalement les ordres de grandeur sur l'élévation de température qui résulte d'une augmentation donnée de la concentration en CO₂ de l'atmosphère car cette élévation de température résulte en premier ordre de la quantité d'énergie supplémentaire qui est envoyé vers le sol par un supplément d'effet de serre. Dit autrement

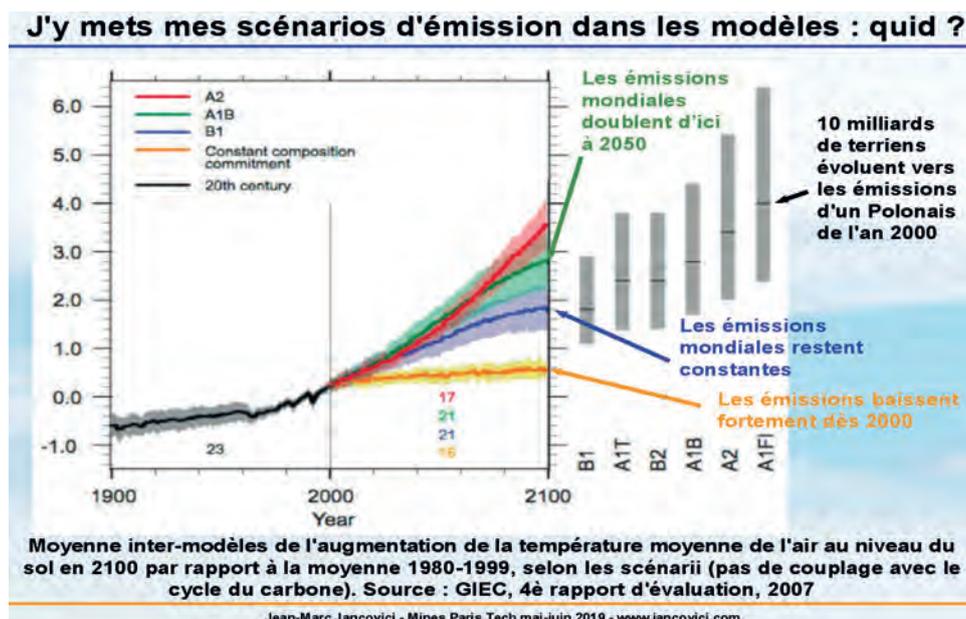
- cela relève d'un processus physique assez bien compris d'absorption / réémission par un gaz
- une fois que vous avez l'énergie totale qui retourne au sol et que vous savez faire la différence entre ce qui est absorbé par l'océan et ce qui est absorbé par le sol, il est assez aisé d'obtenir approximativement l'élévation de température du sol

La sophistication des modèles permet notamment d'améliorer la résolution spatiale, de mieux approcher un certain nombre de phénomènes locaux mais ne change pas fondamentalement les prévisions sur l'élévation de température moyenne. Car l'élévation de la température moyenne représente l'élévation de la quantité d'énergie contenue dans le système.



Les modèles sont systématiquement testés / calibrés sur le passé (ci-dessus l'élévation des températures).

Chapitre 20 - Les scénarii du GIEC



Evolution moyenne de la température en fonction du scénario d'émission de GES :

- scénario 01 : baisse sensible et immédiate des émissions et zéro émission atteint avant la fin du XXI^e siècle. Dans ces conditions, l'objectif d'une augmentation de 1,5° (par rapport à l'ère préindustrielle, 1850) peut être atteint.
- scénario 02 : les émissions mondiales demeurent constantes et dans ce cas l'augmentation d'ici la fin du XXI^e siècle sera d'environ 2° (soit 3° par rapport à l'ère préindustrielle). Forte variabilité des modèles : entre +1° et +3° selon les paramètres considérés

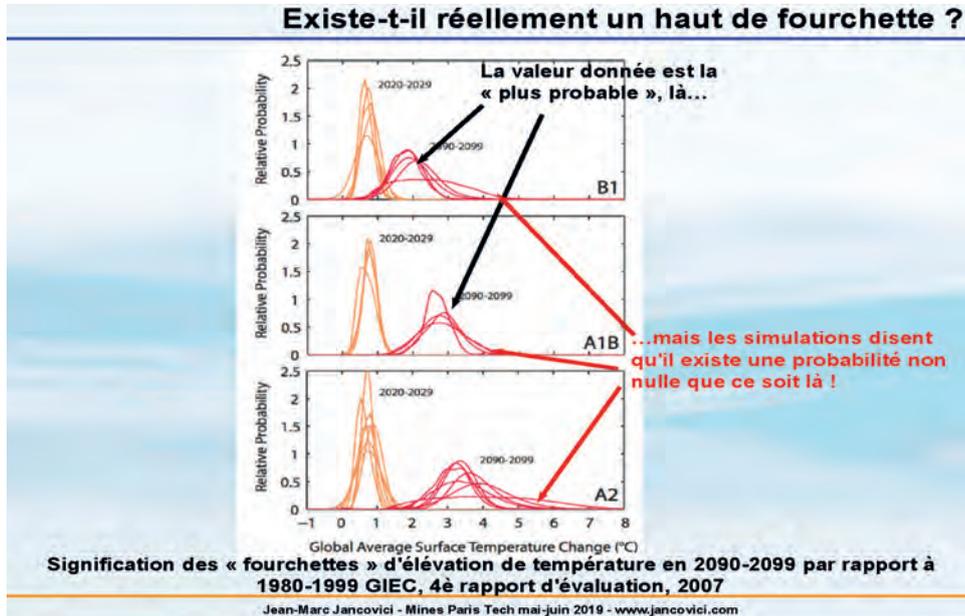
(2° changent tout au niveau des conséquences)

- scénario 03 : scénario intermédiaire / scénario "charbon haut" dans lequel les émissions doublent d'ici 2050 et où la température augmente de 3° à la fin du siècle (+1,5° pour les modèles les plus optimistes, +4° pour les pessimistes)
- scénario 04 : scénario "polonais" (10 milliards de Terriens polluent comme des Polonais d'aujourd'hui) conduit à une augmentation de 5°

Notes :

> ère préindustrielle = 1850, date depuis laquelle la température a déjà augmenté de 1°

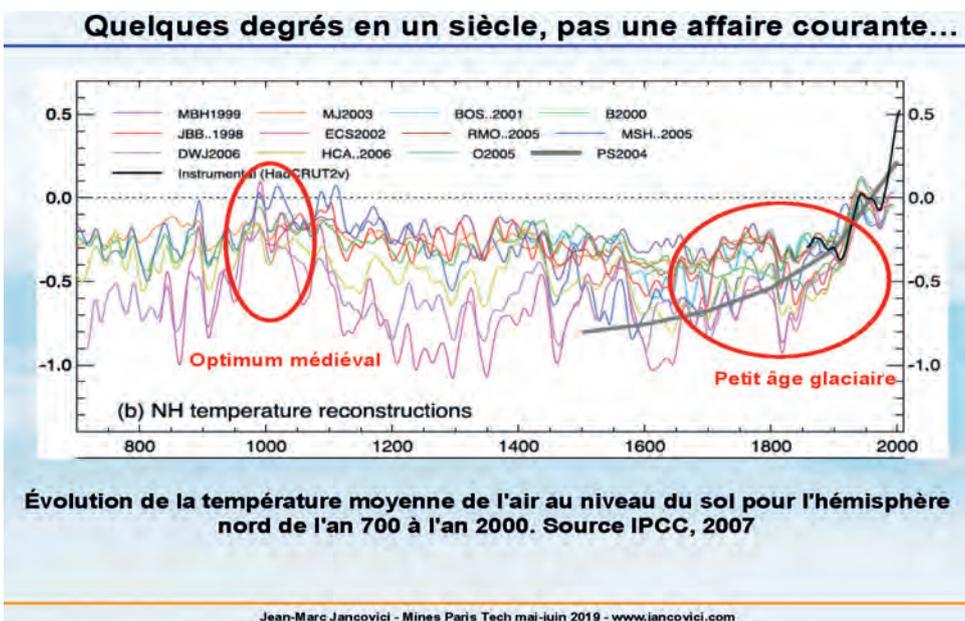
> grande incertitude sur le degré de réchauffement signifie qu'il y a un grand risque car incapacité à fixer une borne supérieure



Une grande dispersion des valeurs / des estimations de hausse de température en fonction des modèles utilisés est constatée pour tous les scénarii. Explication : pour 1 même modèle il est possible de faire plusieurs simulations en modifiant légèrement certains paramètres.

- la distribution des résultats est donc élargie
- et la valeur officielle publiée est celle qui est considérée comme la plus probable dans cette distribution (sans garantie que la valeur ne peut pas être plus importante)

Chapitre 21 - Comparaisons avec les changements de températures passés



Confrontation de l'élévation de température prévue à l'expérience passée : la variabilité des températures constatée depuis 2000

ans (par la paléoclimatologie) se situe entre -1 et 0

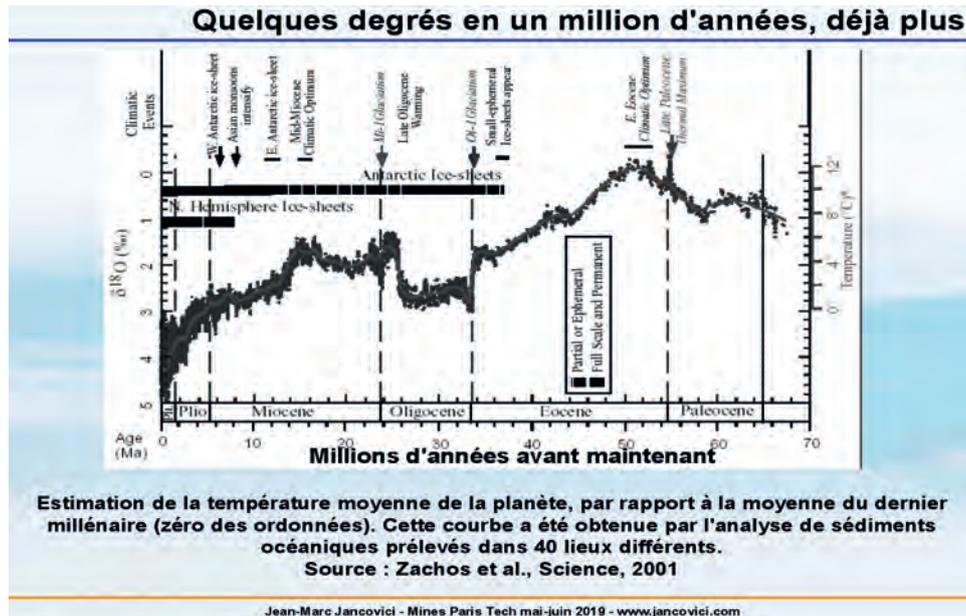
La paléoclimatologie = la science des trous :

- dendrochronologie : faire un trou dans un arbre pour mesure sa croissance annuelle (mesure de l'épaisseur et de la dureté des cernes). Archive climatique limitée car très localisée, terrestre et donne unique- ment les températures et précipitations de la saison de pousse de l'arbre (printemps + été).

Constats :

- optimum médiéval après l'An mil : +0.5°
- petit âge glaciaire XVIIIe : -0.5°
- à partir de l'époque industrielle (1850) : +1°

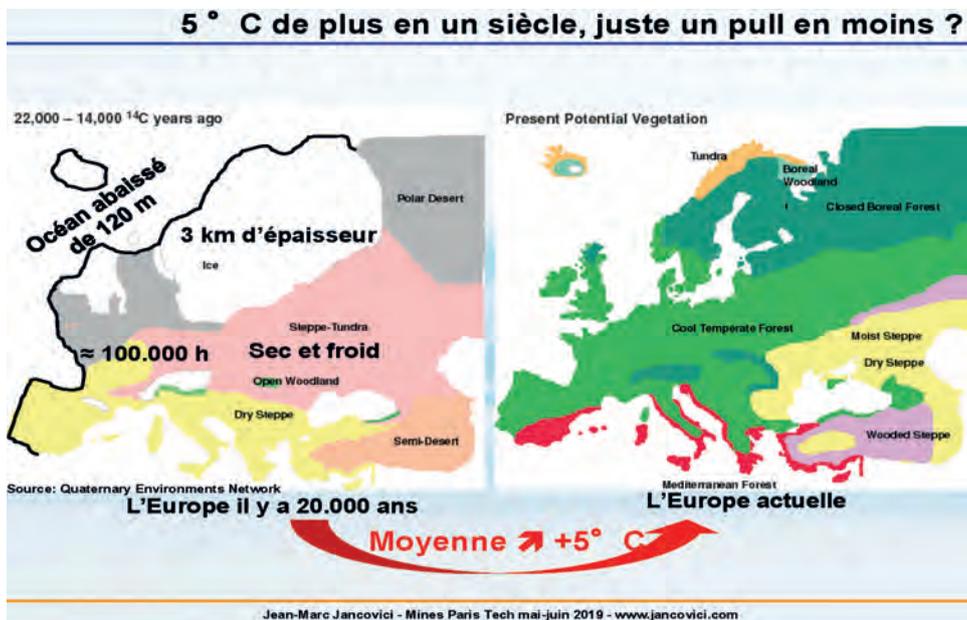
> nous sommes déjà aujourd'hui dans un déplacement de température qui n'a jamais été observé dans le passé (hausse + rapidité)



Avec l'analyse des sédiments océaniques il est possible de remonter plus loin dans le temps. Jusqu'à 60 millions d'années.

Constats :

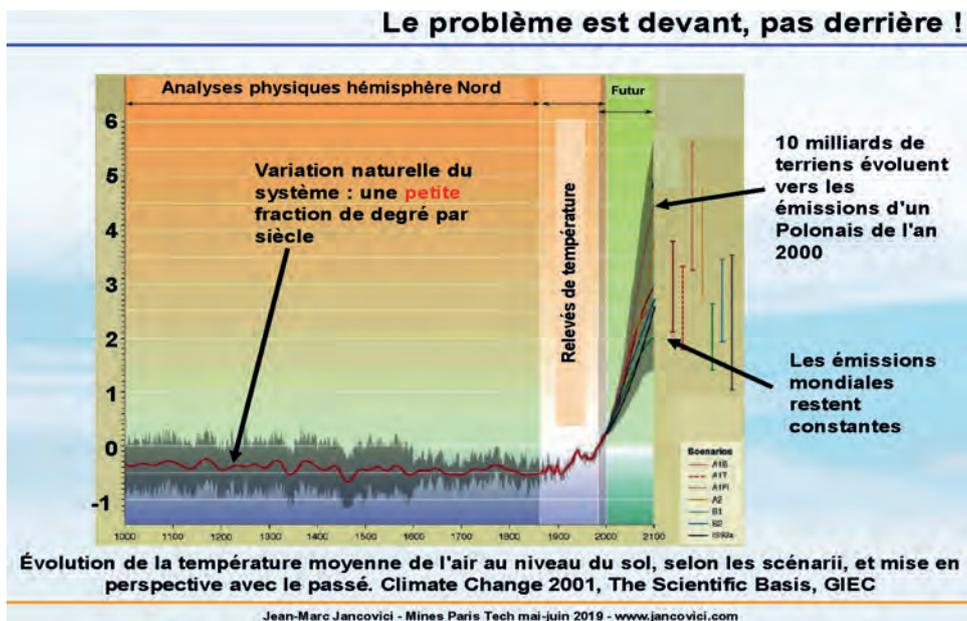
- lent refroidissement du système climatique
- avec une lente diminution de la quantité de CO2 dans l'atmosphère
- +12° il y a 50 millions d'années, une atmosphère plus chaude pas une nouveauté : la nouveauté réside dans la présence des hommes
- les variations de température ont toujours existé et ont produit des effets sur l'humanité : la nouveauté réside dans l'ampleur et l'accélération de la hausse des températures, les effets produits pourraient avoir des effets majeurs sur l'humanité (combien de survivants ? dans quelles conditions ? ...)



Il y a 20 000 ans, au cœur de la dernière ère glaciaire, il faisait 5° de moins :

- océan abaissé de 120 mètres (eau transformée en glace sur le Nord de l'Europe, de l'Amérique, de l'Asie)
- le Nord de l'Europe recouvert par une calotte glaciaire de 3km d'épaisseur
- climat plus froid = beaucoup moins d'évaporation = climat plus sec = végétation du nord de la Sibérie
- capacité de l'écosystème = 100 000 humains

En 5 à 10 000 ans, la température moyenne a gagné 5° : la variabilité du système n'est pas du tout à l'échelle de ce que la civilisation industrielle déclenche aujourd'hui. Quelques millénaires contre quelques siècles, voire décennies.



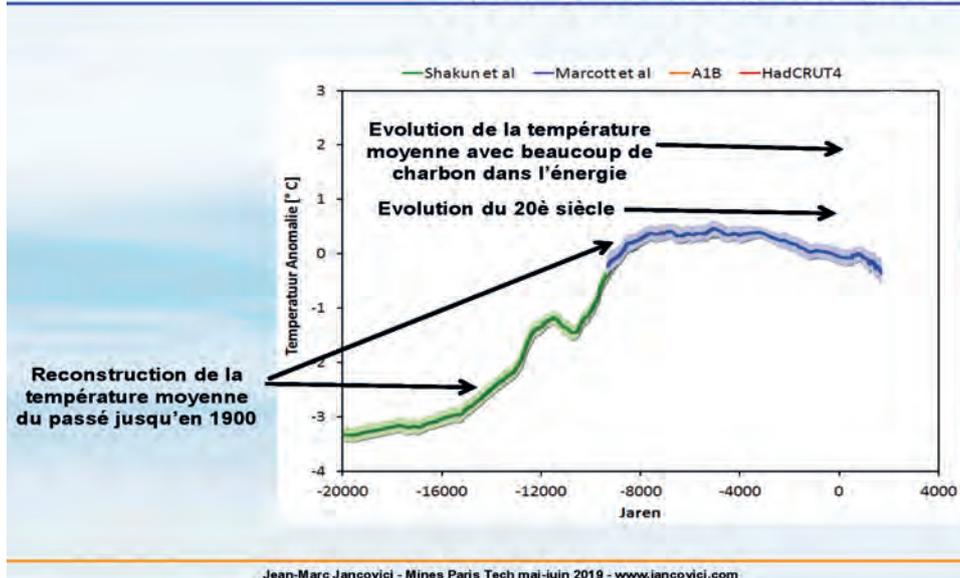
La variation naturelle du système est bien attestée par l'analyse des arbres (dendrochronologie) au cours du dernier millénaire, il s'agit d'une petite fraction de degré à la hausse ou à la baisse.

A partir de 1860 on peut mesurer directement / de manière instrumentale la température moyenne de la planète

- les instruments de mesure directs, en l'occurrence les thermomètres inventé en 1492 (dans les villes et ceux embarqués sur les navires marchands qui sillonnent les océans)
- sont suffisamment généralisés partout sur la planète à partir de la moitié du XIXe pour pouvoir remplacer la dendrochronologie

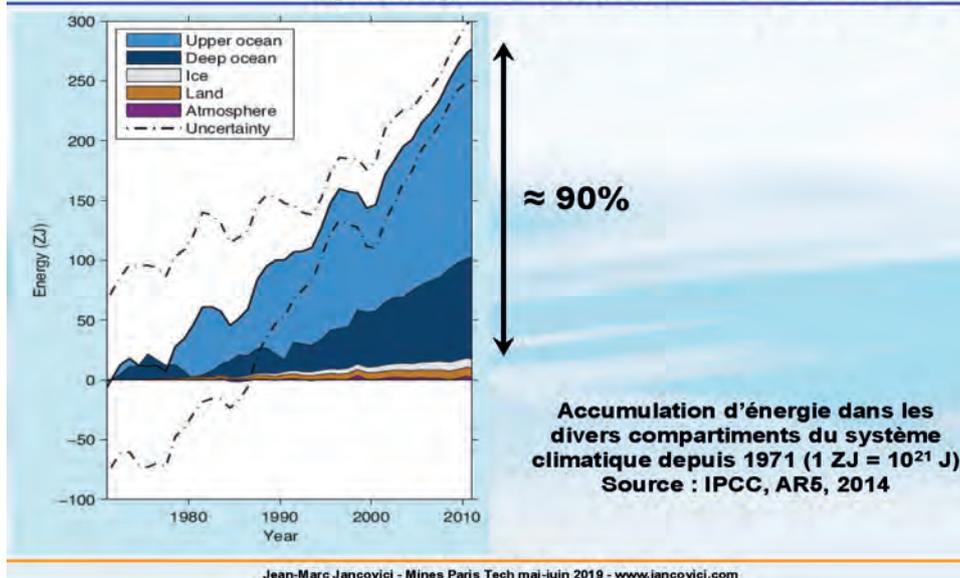
L'évolution future des températures est modélisée et montre – quel que soit le scénario retenu - que le changement à venir est sans commune mesure avec les évolutions passées / la variabilité naturelle du système. Même à 2° d'augmentation, il y aura une quantité de dysfonctionnements considérables.

Et pour quelques degrés de plus...



Le carottage (analyse des isotopes de l'eau et de l'oxygène des calottes glaciaires) permet de suivre l'évolution des températures bien plus loin que la dendrochronologie. A l'échelle de temps de 20000 ans, l'évolution de la courbe de température fait un angle à 90° au XXIe siècle.

Il paraît que le réchauffement s'est arrêté ?



L'élévation de température déjà en cours et qui va s'accélérer au XXIe siècle et

- ne concerne pas seulement l'élévation de la température de l'atmosphère (= la partie émergée de l'iceberg)
- le supplément d'énergie provoqué par le supplément d'effet de serre se loge à 90% dans l'océan / réchauffe l'océan

Il suffit donc que l'enfouissement de l'énergie soit - du fait des courants - moindre une année pour que l'on constate un réchauffement supérieur de l'atmosphère (et vice-versa). La variabilité annuelle de la température atmosphérique dépend du comportement de la circulation des océans, du processus d'enfouissement de la chaleur dans l'océan.

Globalement le système emmagasine toujours plus d'énergie mais ponctuellement, la traduction de ce phénomène est plus ou moins visible dans l'atmosphère selon la circulation océanique.

Chapitre 22 - Les impacts du changement climatique

Les impacts

A / L'augmentation de la température de l'atmosphère et de l'océan

Quels 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

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Règle 1 : l'ampleur des impacts dépend de l'ampleur des émissions

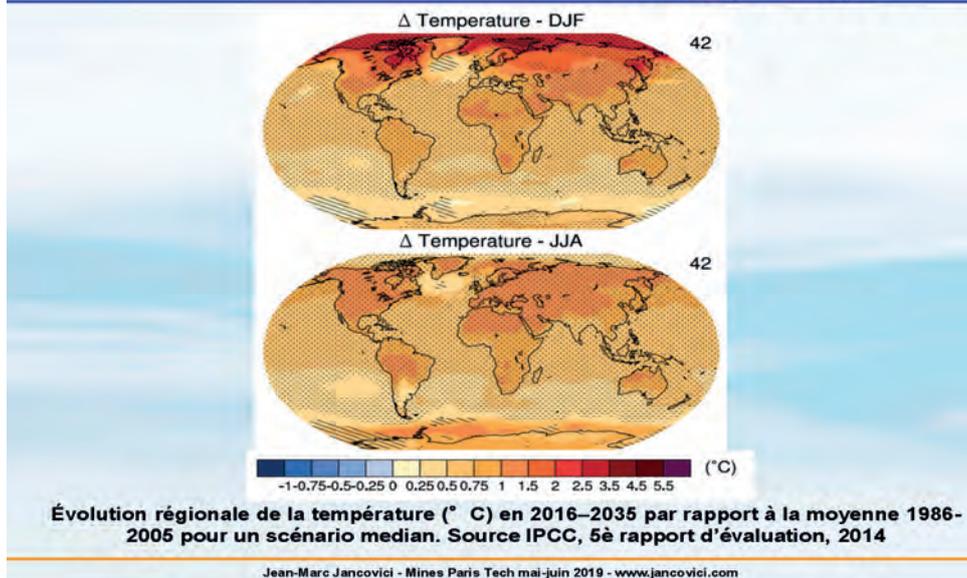
- impacts sur les écosystèmes (affaiblissements, disparitions et déplacements)
- impacts sur les océans (augmentation du niveau, modification des courants marins et donc des climats régionaux, acidification des océans, ...)
- impacts sur les phénomènes météorologiques extrêmes (accroissement en nombre et en intensité des pics de chaleur, des précipitations intenses, des sécheresses, ...)
- impacts sur la santé humaine (déplacement des zones endémiques pour les maladies, ...)
- impacts politiques / géopolitiques

Règle 2 : impossible de prévoir à l'avance, à quelques dizaines d'années, l'ensemble des impacts du dérèglement climatique car

- la situation est inédite
- et le système climatique trop chaotique pour pouvoir prévoir tous les changements, anticiper les dates des phénomènes et leur localisation régionale.

Des mauvaises surprises ne cesseront d'être découvertes au fur et à mesure du dérèglement climatique.

Chauffe (un peu) Marcel

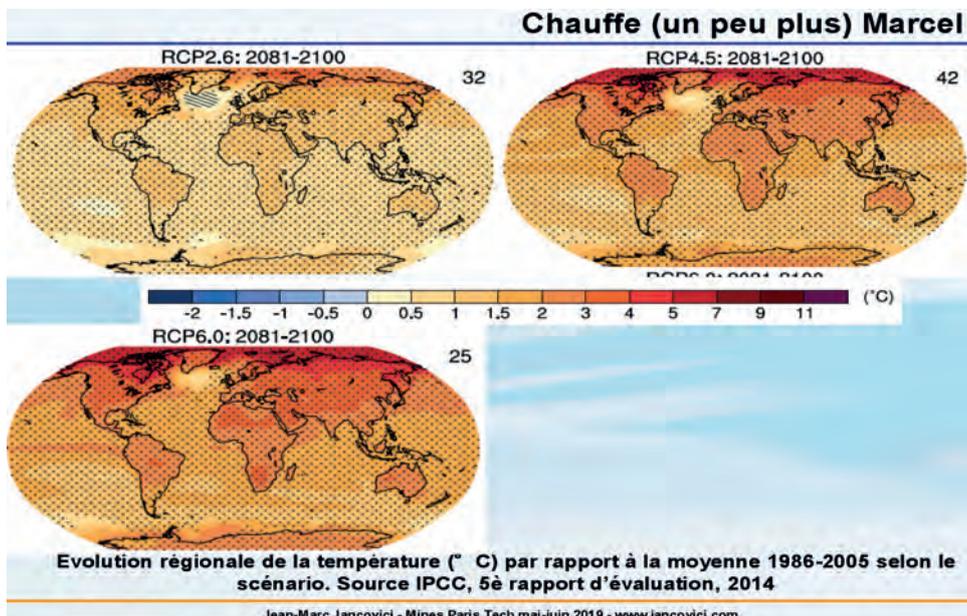


Des constantes ont été mises au jour concernant le réchauffement global.

La structure spatiale est connue approximativement

- > l'élévation des températures est plus importante - quelle que soit la saison - sur les terres émergées que sur les océans (qui disposent de plus d'inertie thermique)
- > l'élévation est plus importante sur l'hémisphère Nord que sur l'hémisphère Sud
- > l'élévation de température est proportionnellement plus marquée l'hiver dans les hautes latitudes Nord que l'été (= l'élévation de température sera proportionnellement plus marquée l'hiver que l'été).
- > l'élévation de température est moins marquée qu'ailleurs dans l'hémisphère Nord - quelle que soit la saison - au Sud du Groenland

Conclusion : l'endroit où le réchauffement sera particulièrement marqué, la Région Arctique. Déjà on constate des températures totalement "hallucinantes" en hiver (température positive au Pôle Nord au 1er janvier 2018)



L'élévation de température dépendra du scénario d'émissions.

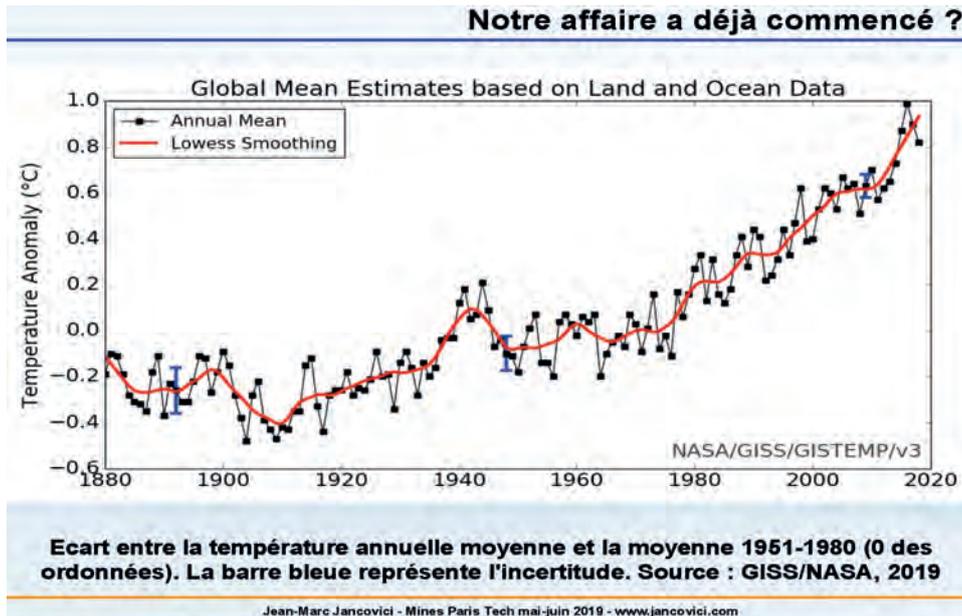
RCP (Representative Concentration Pathway) = concentration des GES dans l'atmosphère imputable à l'homme depuis la Révolution industrielle, mesurée en Watt par m²

Plusieurs scénarii en fonction de l'intensification de l'effet de serre :

- RCP 2.6 = forçage radiatif de 2,6 W/m² en 2100 (2.6 est approximativement le forçage radiatif d'aujourd'hui)

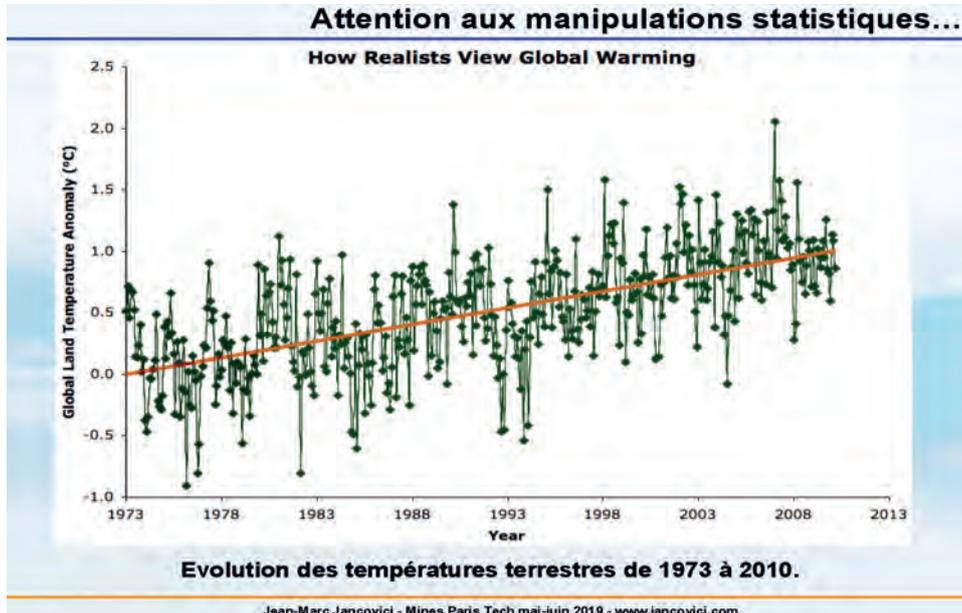
- RCP 4.5
- RCP 6.0
- RCP 8.5 = scénario purement théorique car impliquerait une économie florissante dans un contexte de Nature ravagée

Dans chacun des cas la distribution régionale du réchauffement est confirmée.



Augmentation de la température constatée depuis les années 70.

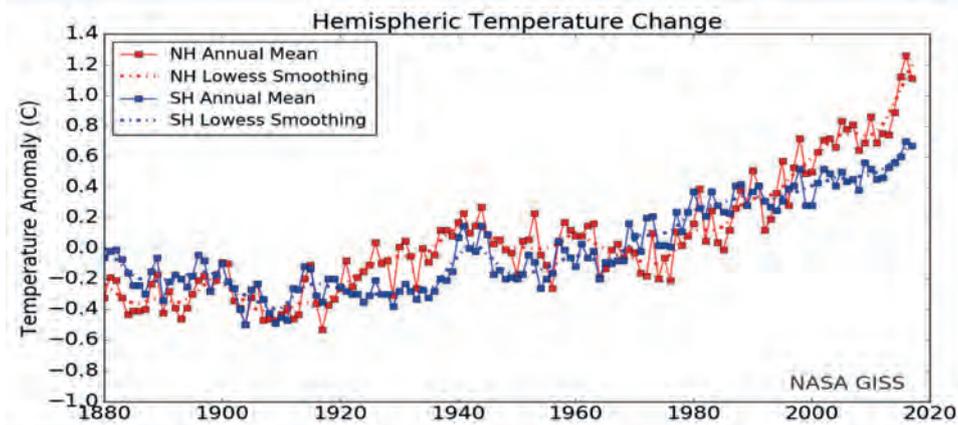
Les 20 premières années des 30 Glorieuses, ère de l'industrialisation accélérée du monde, a paradoxalement abouti à un refroidissement des températures (hypothèse : usage massif de charbon et de pétrole sans mesures d'antipollution, aboutissant à l'envoi dans l'atmosphère de particules soufrées réfléchissantes)



Attention à bien considérer des séries longues : le biais des climato sceptiques consiste à utiliser des séries courtes contredisant la tendance globale du réchauffement.

A propos des climato sceptiques : la population des Etats-Unis est la plus climato sceptique (devant l'Arabie Saoudite, l'Egypte et la Norvège).

Notre affaire a déjà commencé ?



Ecart entre la température annuelle moyenne et la moyenne 1951-1980 (0 des ordonnées), pour chaque hémisphère. Source : GISS/NASA, 2019

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

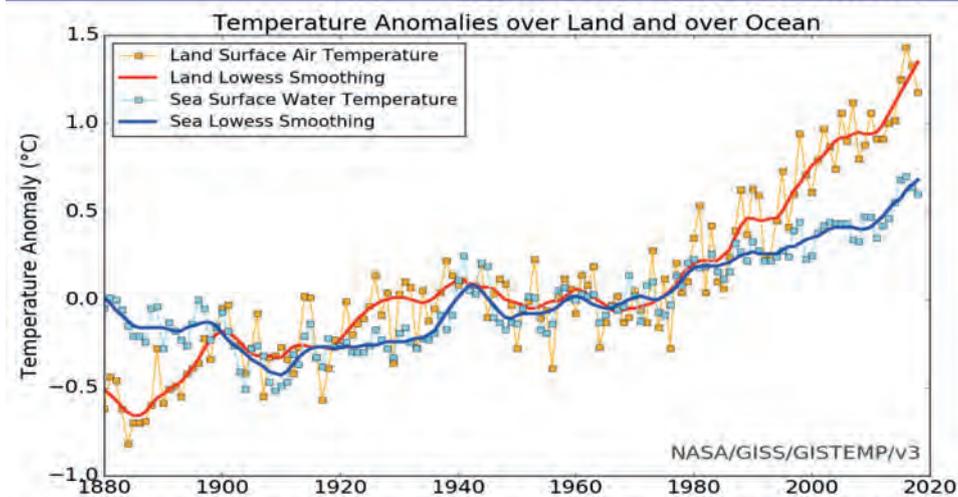
Evolution de la température hémisphérique

- les variations de température de l'hémisphère sud sont globalement moins heurtées que celles du nord
- l'augmentation de température y est également un peu moins rapide

Explication :

- plus de terres émergées dans l'hémisphère nord
- évolution plus rapide en Arctique

Notre affaire a déjà commencé ?

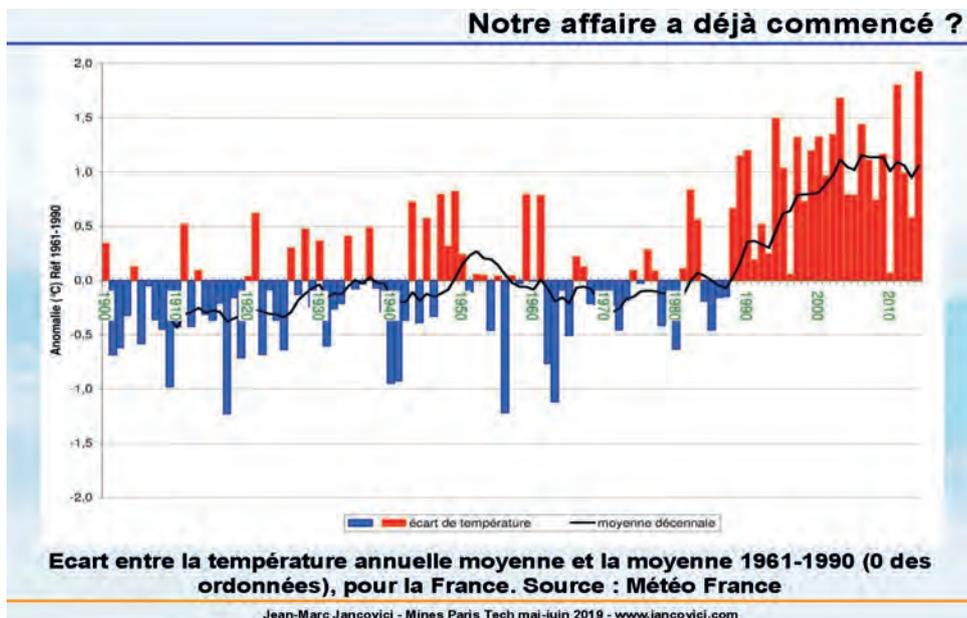


Ecart entre la température annuelle moyenne et la moyenne 1951-1980 (0 des ordonnées), pour l'océan et les terres émergées. Source : GISS/NASA, 2019

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Analyse des moyennes différenciées Continents / Océans :

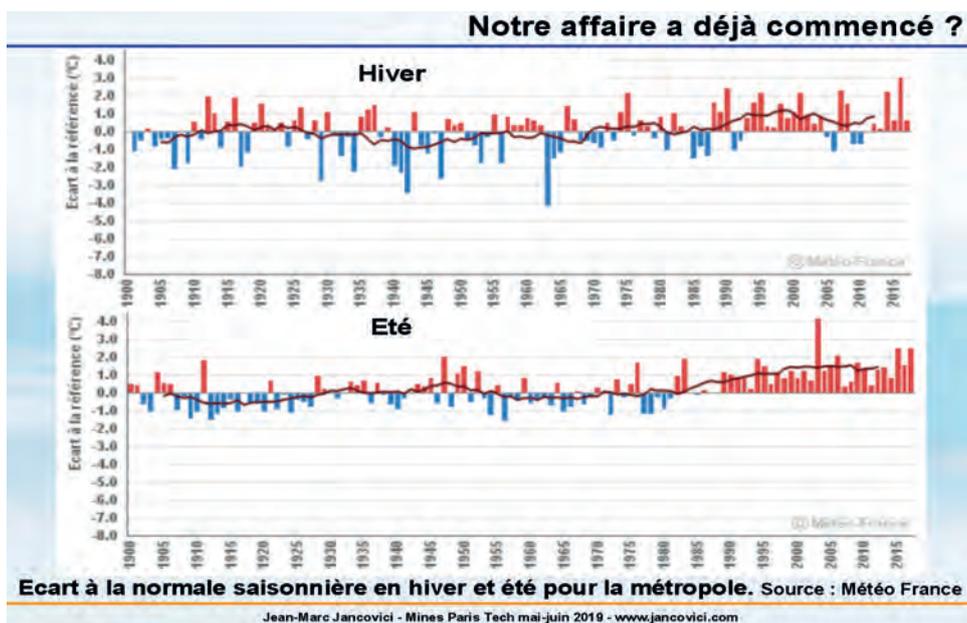
- baisse des températures sur les continents dans les 2 premières décennies des 30 Glorieuses (SO₂) qui conduit la courbe des températures des continents à rejoindre celle des océans
- découplage à partir des années 80, la température sur les continents augmente plus vite que sur les océans du fait de l'inertie thermique plus grande des océans



Courbe de l'évolution annuelle des températures pour la France depuis 1900

- par rapport à la moyenne trentenaire des températures connues de 1961 à 1990
- les moyennes annuelles sont systématiquement supérieures depuis 1990
- il n'y a plus d'alternance / d'années "froides"

Cela explique que d'années en années ou presque les journaux titrent sur les records de températures bat-tus. Ce n'est que le début, un "marronnier".

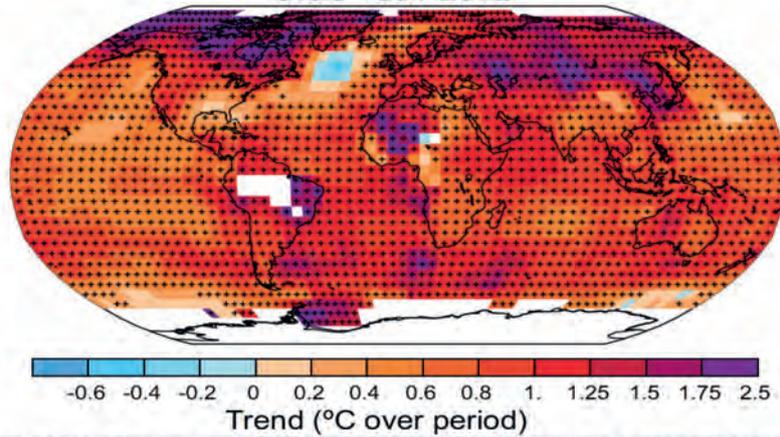


Variation des températures hivernales et estivales en métropole depuis 1900

- l'évolution de température en hiver et en été sont tendanciellement à la hausse
- la variabilité des températures durant la saison hivernale est plus importante, le réchauffement climatique dans son ensemble n'empêche pas la survenue d'hivers plus froids que la moyenne (c'est moins fréquent mais ce n'est pas impossible)

Un changement déjà décelable ?

GISS 1901-2012



Différence de température moyenne entre 1901 et 2012 reconstituée par le Global Institute for Space Studies (NASA). Les zones blanches correspondent à des endroits où il n'y a pas assez de données. Source : 5th Assessment Report, IPCC, 2014

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Reconstruction de la variation de température au XXe siècle

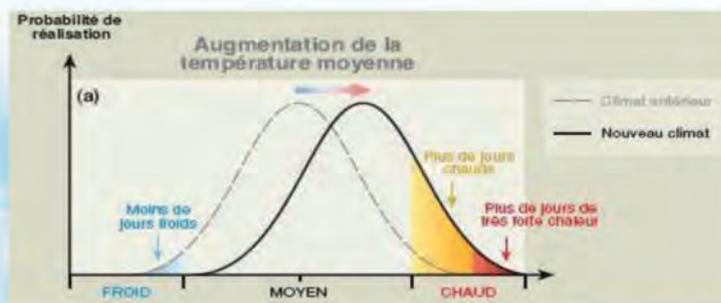
Est-ce que la structure spatiale de l'élévation de température correspond à ce que l'on est en droit d'attendre d'un climat qui se réchauffe avec un supplément d'effet de serre ?

Dans un climat qui se réchauffe par supplément d'effet de serre, un des phénomènes prévisibles est :

- une élévation de température plus marquée sur les continents
- et particulièrement marquée en zone Arctique

Dans l'élévation de température déjà observée durant le XXe siècle, c'est exactement ces deux phénomènes qui sont constatés. Plus la singularité au sud du Groenland.

Un simple déplacement de moyenne sera déjà un problème



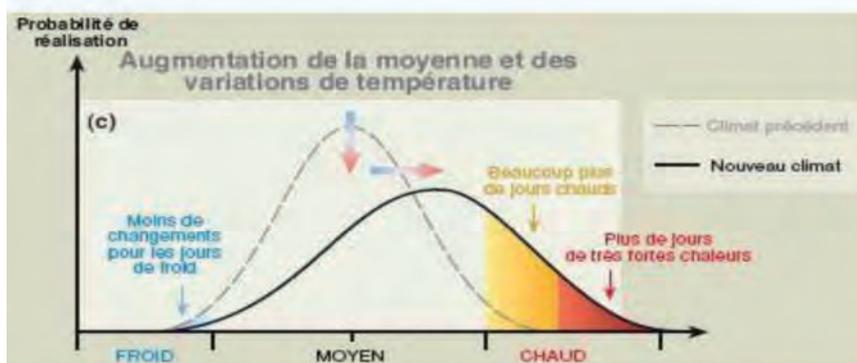
Elevation probable des épisodes de canicule. Source : Climate Change 2001, the scientific Basis, GIEC

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Conséquences du réchauffement global des températures

- une augmentation des températures maximales
- l'élévation probable des épisodes de canicule

Et en plus la variabilité peut s'en mêler !



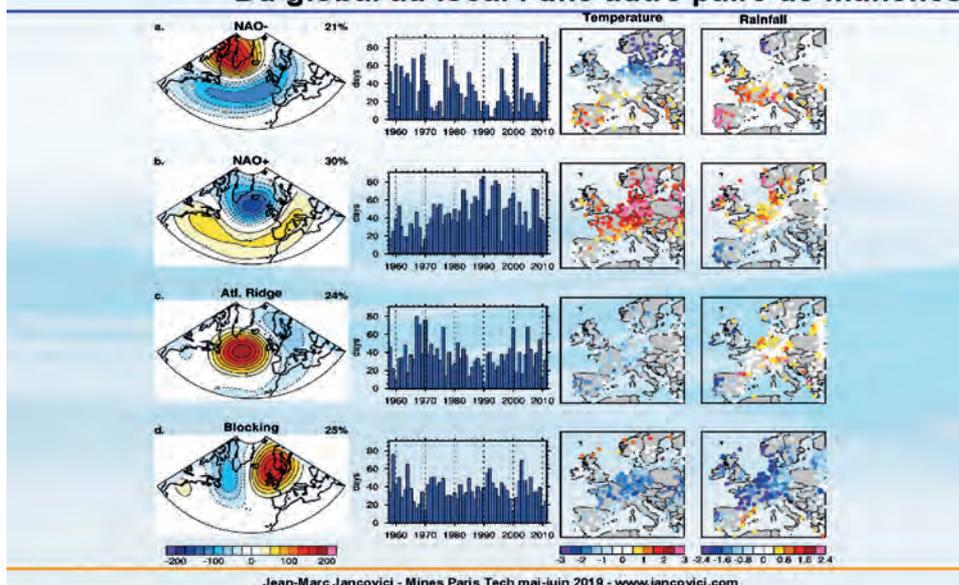
Forte élévation possible des épisodes de canicule. Source : Climate Change Source GIEC, 4^e rapport d'évaluation, 2007

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Le risque caniculaire s'accroît si la variabilité augmente, or la variabilité des températures est une des caractéristiques attendues de l'élévation globale des températures.

Les périodes extrêmement chaudes et / ou extrêmement sèches vont avoir tendance à se répéter plus souvent.

Du global au local : une autre paire de manches



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Autre élément de variabilité à considérer :

Exemple de l'Europe, continent soumis à un régime de vent d'ouest et donc sensible au positionnement relatif de l'anticyclone et de la dépression située sur l'Atlantique.

Quatre combinaisons possibles :

- régime NAO- : l'anticyclone se situe au Nord et la dépression au Sud
- régime NAO+ : l'inverse
- régime Atlantic Ridge : l'anticyclone se situe à l'ouest et la dépression à l'est
- régime Blocking : l'inverse

Ces régimes commandent à la localisation sur le continent des précipitations et font également varier localement les températures.

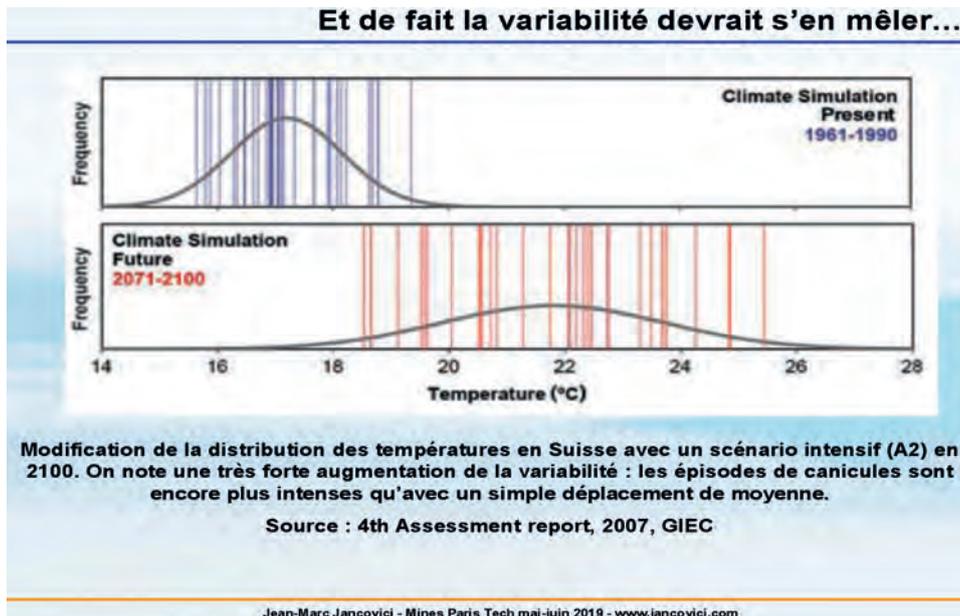
La question - non résolue à ce jour par les climatologues - est de savoir si la fréquence de survenue de ces régimes (actuellement distribué à 25% chaque environ) va rester stable dans un contexte de réchauffement global.

Si la fréquence d'occurrence change, cela signifie qu'il y aura un phénomène d'amplification sur l'Europe par rapport à l'évolution

globale du réchauffement.

Scénario catastrophe (qu'il est impossible pour l'instant de modéliser) :

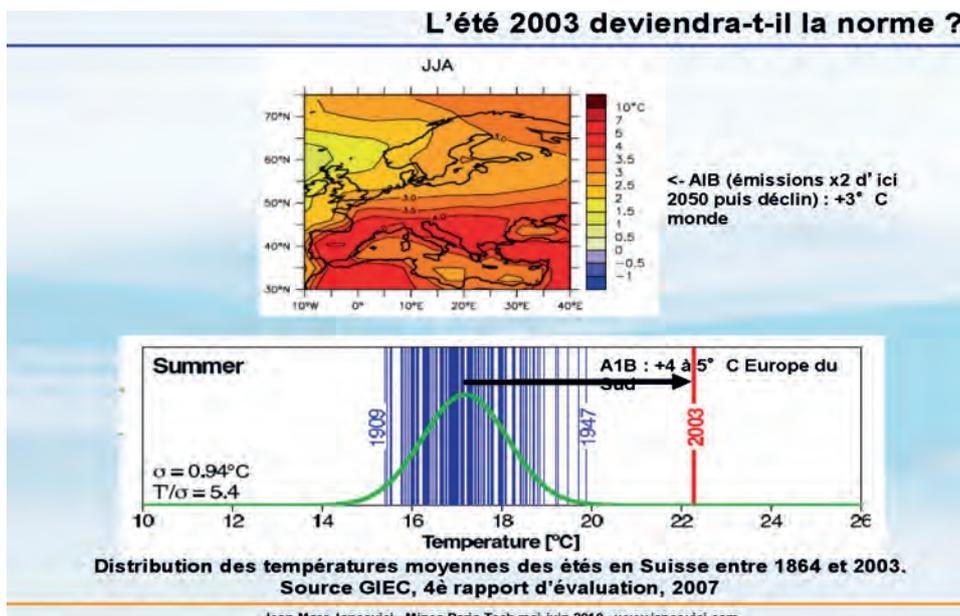
- moins de précipitations et hausse des températures
- activité agricole menacée



Application.

- Distribution des températures en Suisse des années 60 à 90
- Comparée au climat futur à la fin du XXIe siècle

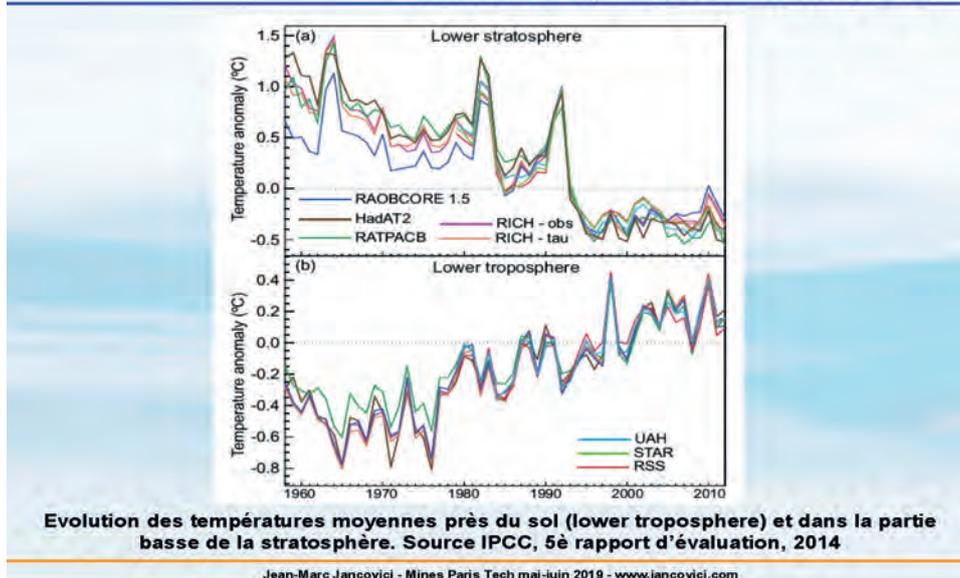
Non seulement on constate une augmentation de la moyenne des températures mais également un accroissement sensible de la variabilité des températures. Par conséquent les températures extrêmement élevées ne seront pas "un peu plus fréquentes" mais très sensiblement plus fréquentes.



Dans un climat qui se réchauffe de quelques degrés, la canicule connue en 2003 devient un été "moyen" à la fin du siècle (50% des étés seront plus chauds : adieu aux forêts et aux récoltes). A retenir : le nombre de

degré du réchauffement global est une moyenne qui masque les variations extrêmes.

Chaud aux pieds mais froid à la tête



Un autre marqueur du dérèglement climatique / du supplément d'effet de serre induit par l'activité humaine : la baisse de température de la stratosphère

Phénomène physique :

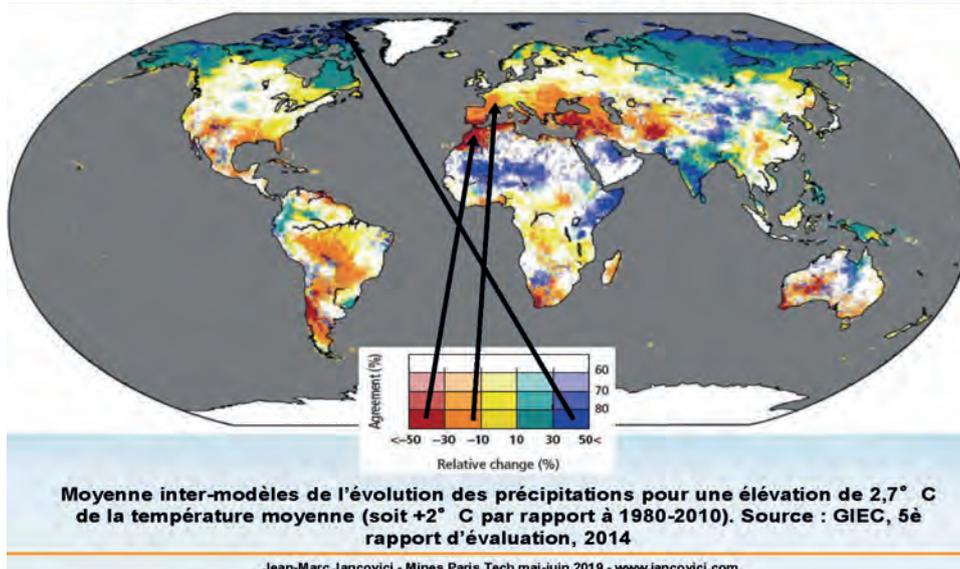
- > augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère
- > augmentation de l'opacité de l'atmosphère au rayonnement des infrarouges lointains émis par la planète
- > réchauffement de la basse atmosphère (troposphère, les 10 premiers kilomètres) et du sol (qui augmente la restitution de la chaleur par ses 3 processus habituels)
- > refroidissement de la haute atmosphère qui intercepte moins d'infrarouges lointains

Conséquence :

- creusement de l'écart de température entre les températures au sol (troposphère) et les températures de la partie basse de la stratosphère
- plus grande violence des "accidents" climatiques

B / La variation des précipitations

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



Deuxième conséquence du dérèglement climatique, en plus du réchauffement, la variation des précipitations :

- dans un climat plus chaud il y a globalement plus d'évaporation, donc plus de précipitations
- toutefois ces précipitations n'ont aucune raison de se répartir de manière homogène sur la planète, ni spatialement ni temporellement.

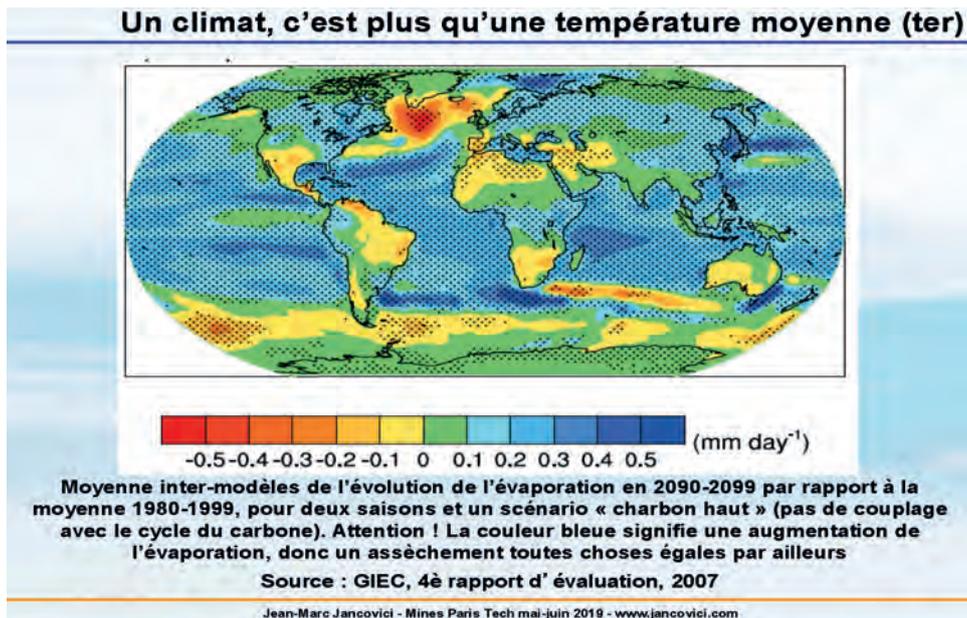
Les chercheurs tentent de savoir comment va se répartir cette augmentation des précipitations. Les prévisions sont plus complexes que pour l'élévation des températures car la modélisation de la couverture nuageuse est moins facile.

Quelques conclusions tout de même :

- globalement, les précipitations vont avoir tendance à augmenter fortement dans les hautes latitudes nord et sur une partie de la bande équatoriale
- mais des régions où les précipitations vont avoir tendance à baisser, notamment forte baisse dans les bandes tropicales.

Le bassin méditerranéen est l'espace où les précipitations vont le plus baisser. Ce phénomène :

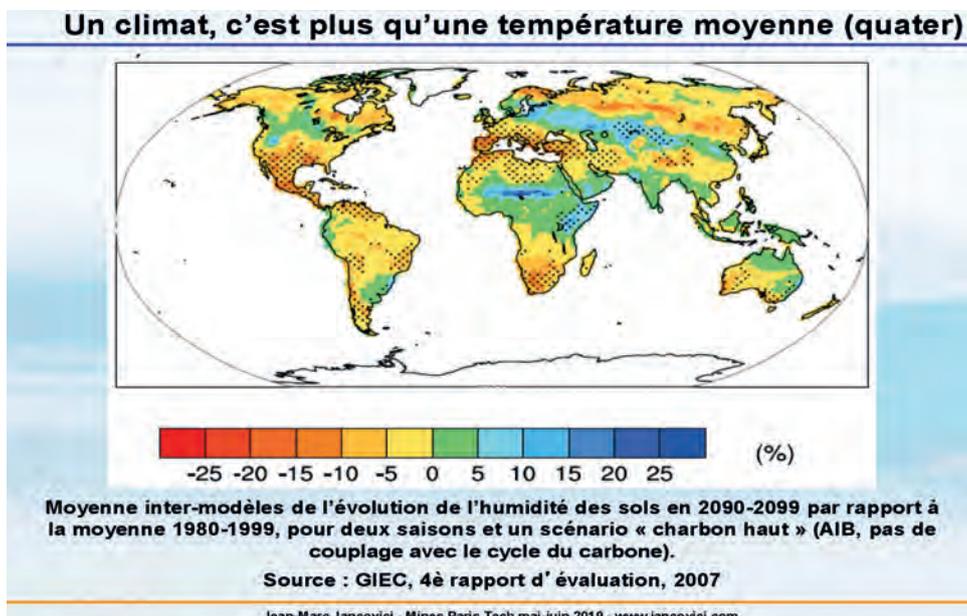
- a déjà produit des effets, il est en partie responsable des émeutes de la fin à l'origine du printemps arabe (dans des pays non autosuffisant sur le plan alimentaire et incapables de compenser les pertes par des importations supplémentaires de nourriture)
- se répètera à l'avenir car les causes climatiques seront toujours présentes et de plus en plus pressantes
- va atteindre rapidement le sud de l'Europe (exemple de l'Espagne dont une partie de l'agriculture repose sur le pompage de nappes phréatiques qui ne se renouvellent pas)



La variation de l'évaporation est également à prendre en compte : la teneur en eau du sol est le résultat des précipitations moins le résultat de ce qui s'évapore et de qui ruisselle.

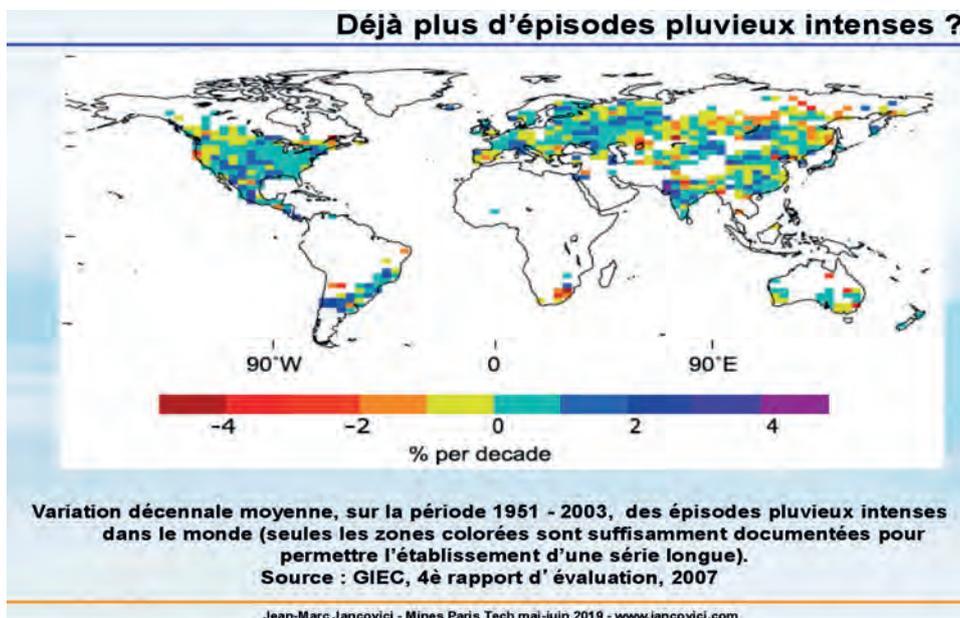
Par exemple dans les zones de mousson, les pluies peuvent être plus abondantes mais si elles interviennent après une période extrêmement sèche, une partie accrue de la pluie ruisselle et l'eau n'est pas conservée par le sol et ne sert à rien du point de vue de la végétation (au contraire, des inondations).

Globalement l'évaporation aura tendance à s'intensifier partout sur le globe.



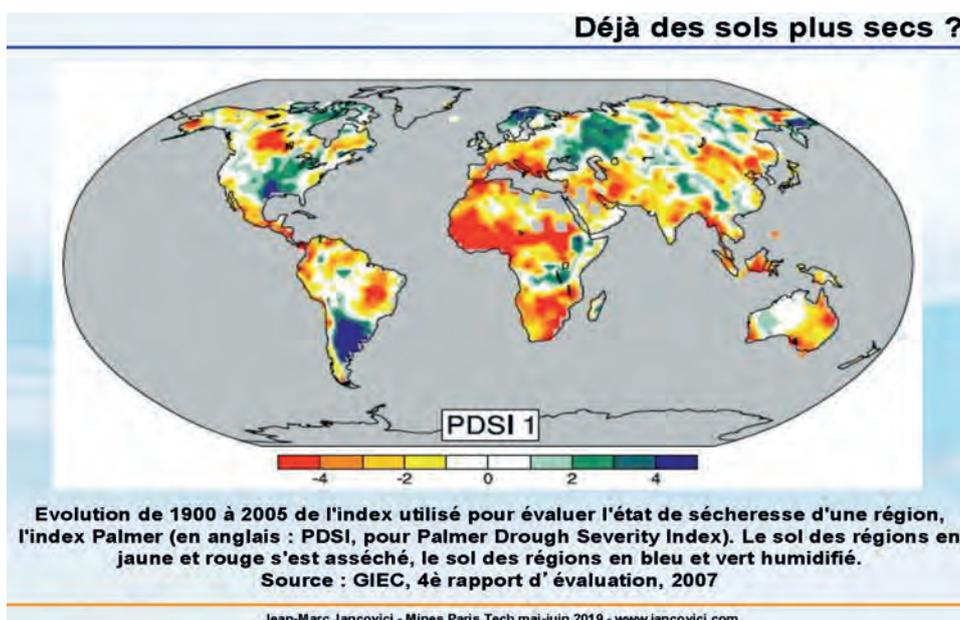
L'évolution de l'humidité des sols (évaluée à partir des prévisions de précipitations et d'évaporation) est une donnée cruciale pour anticiper les rendements agricoles et la stabilité / santé des écosystèmes.

- assèchement du pourtour du bassin méditerranéen,
- assèchement du quart sud-ouest de l'Australie (bassin agricole)
- assèchement du sud de l'Afrique,
- assèchement du bassin amazonien (risque de dépérissement de la forêt et donc libération de CO₂ puisque l'Amazonie constitue le plus grand stock de carbone sur pied de la planète),
- assèchement du golfe du Mexique, Amérique centrale et sud des Etats-Unis



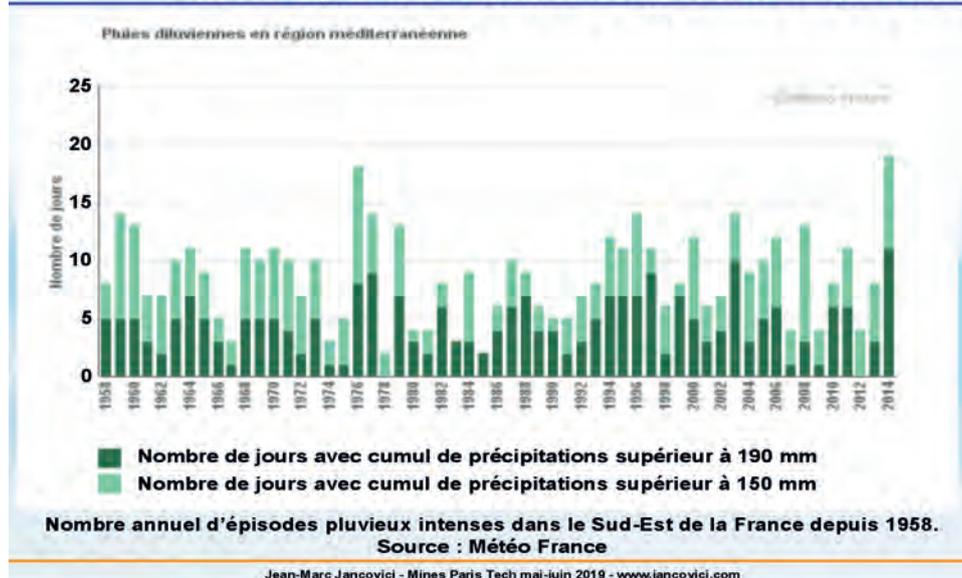
L'analyse de l'évolution des phénomènes pluvieux intenses montre une tendance à l'augmentation des épisodes, notamment dans l'hémisphère nord.

Non seulement ces épisodes sont sources de catastrophes humaines mais sont également ravageurs pour la nature (les précipitations ruissellent et ne servent pas à la croissance végétale).



On constate déjà un assèchement des sols de certaines régions, qui préfigure ce qui est attendu pour les décennies à venir : Bassin méditerranéen, sud de l'Afrique, bassin amazonien, Amérique centrale, ...

Plus « d'épisodes cévenols » en France ? : pas clair



Les épisodes cévenols - phénomène de précipitations intenses - se produisent en fin d'été,

- à un moment où la Méditerranée est encore chaude
- alors que la température sur la terre a commencé à refroidir
- les nuages passés par la Méditerranée, chargés en eau, remontent en altitude (= condensation de la vapeur d'eau) en entrant en contact avec le massif des Cévennes / les contreforts du Massif Central
- des trombes d'eau

La question : avec une Méditerranée qui reste chaude plus longtemps, les épisodes cévenols ne vont-ils

pas être plus fréquents / plus intenses ? Pour l'instant difficile de dégager une tendance à la hausse.

En revanche, 1 certitude, la quantité de biens à inonder augmente :

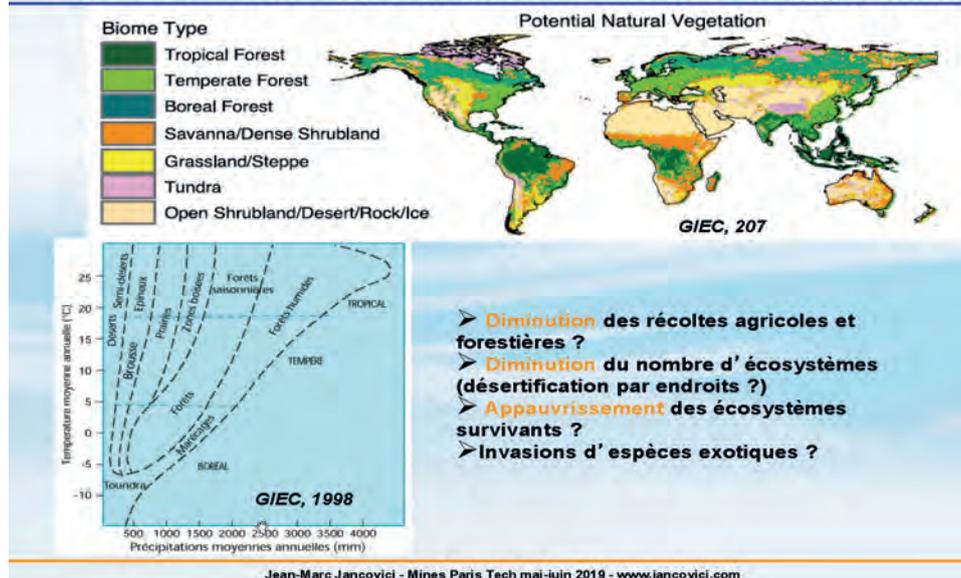
- le processus d'urbanisation est toujours en marche en France / la taille des villes continue à augmenter
- la pression foncière incite à une moins grande prudence et la plupart des villes étant traversées par un cours d'eau, c'est souvent dans ces zones "à risques futurs" que sont bâtis les nouveaux logements

Résumé des paramètres physiques

- augmentation de la température, pas partout de la même manière
- plus d'énergie qui réchauffe l'océan que d'énergie qui réchauffe l'atmosphère
- réchauffement qui impacte le régime des pluies

C / Impacts du changement climatique sur les écosystèmes

Atteintes des écosystèmes continentaux et de l'agriculture

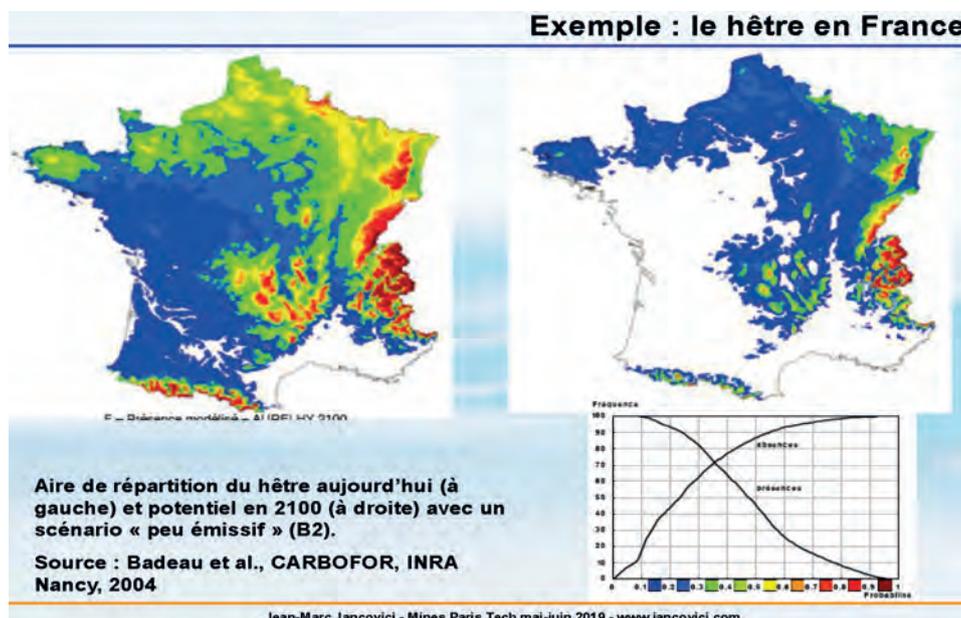


Première conséquence de ces phénomènes physiques sur le vivant : l'impact sur les écosystèmes.

Questions :

- diminution des récoltes (agricoles et forestières)
- diminution du nombre d'écosystèmes existants (désertification par endroits)
- appauvrissement des écosystèmes survivants
- invasions d'espèces exotiques

Le changement des régimes des pluies est le premier déterminant de reproduction des écosystèmes, la température joue un rôle moindre.



Avec le dérèglement climatique, la végétation va nécessairement changer avec une ligne directrice :

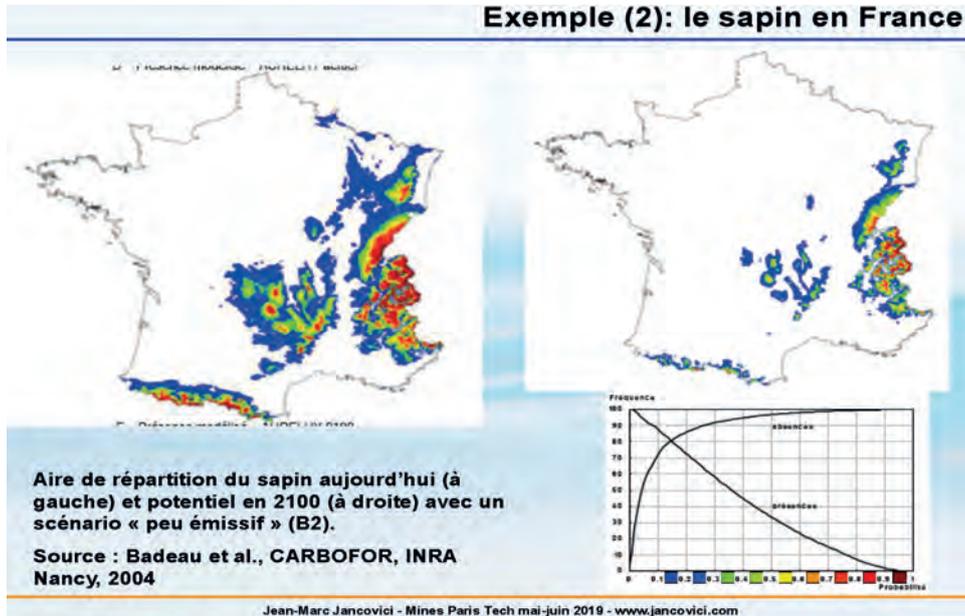
- beaucoup plus de disparitions que d'apparitions d'espèces
- du fait de la rapidité / de la brutalité du changement (pas le temps pour les espèces endémiques d'évoluer / de s'adapter)

Pour anticiper le changement de végétation, plusieurs paramètres qui s'interpénètrent sont à prendre en compte :

- non seulement l'évolution des températures et des précipitations
- mais également la concurrence entre espèces (apparition / prolifération des ravageurs, microbes, virus, champignons...), qui constituent des interactions très difficilement modélisables

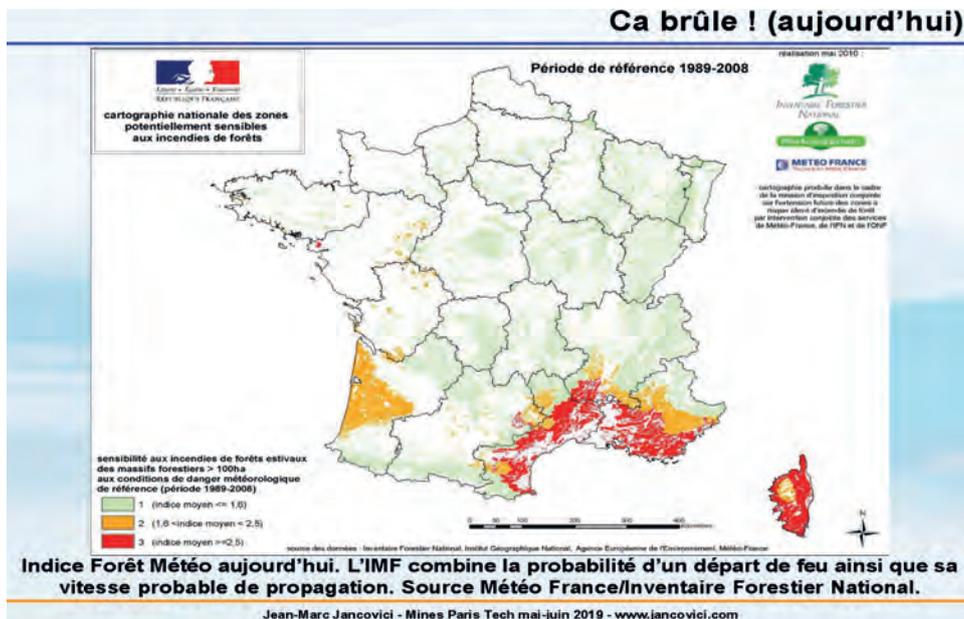
Exemple du hêtre : pour un scénario d'émission optimiste, le hêtre disparaît de l'ouest du pays (pointe bretonne mise à part) du fait du manque d'eau

Exemple (2): le sapin en France



Exemple du sapin : arbre qui apprécie la fraîcheur de l'hiver, par conséquent il ne subsiste que dans les massifs les plus élevés.

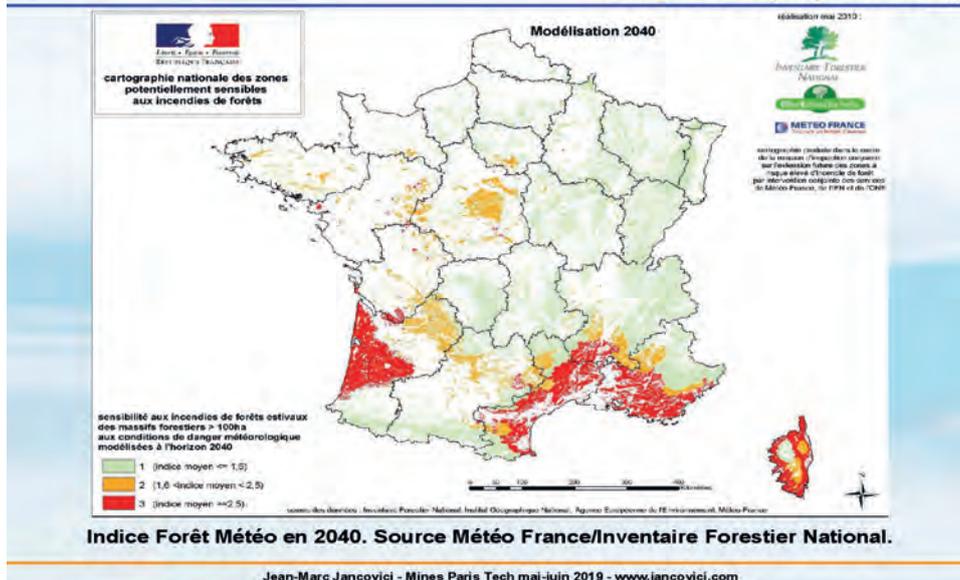
Ca brûle ! (aujourd'hui)



IMF : Indice Forêt Météo = inflammabilité des forêts

- probabilité d'un départ de feu
- et vitesse de propagation

Ca brûle ! (aujourd'hui)



IMF en 2040 :

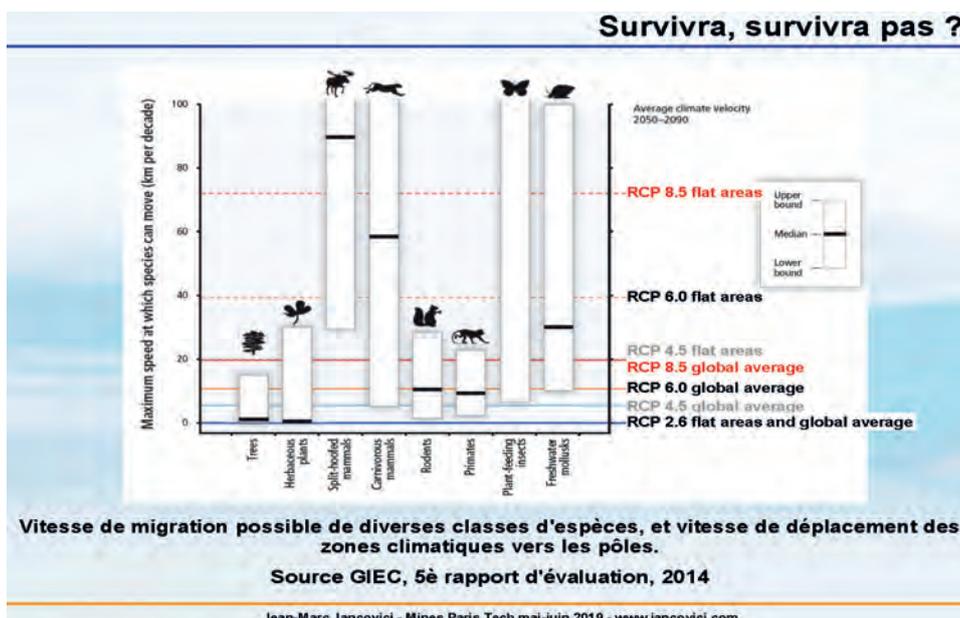
- fort inflammabilité des Landes
- inflammabilité de forêts jusque-là épargnées, même au nord de la Loire

A propos de l'inertie du système climatique

2040 : les prévisions sont certaines, cela va advenir. Car quel que soit le scénario d'augmentation des émissions, la trajectoire d'augmentation des températures d'ici 2040 est la même. Dit autrement,

- l'évolution du climat d'ici 2040 est déjà actée, quel que soit les efforts / réductions d'émission de CO2 décidés aujourd'hui

- c'est ce qui se passera après 2040 qui est désormais en jeu dans les politiques de réduction des GES. Au mieux, on agit pour la génération suivante.



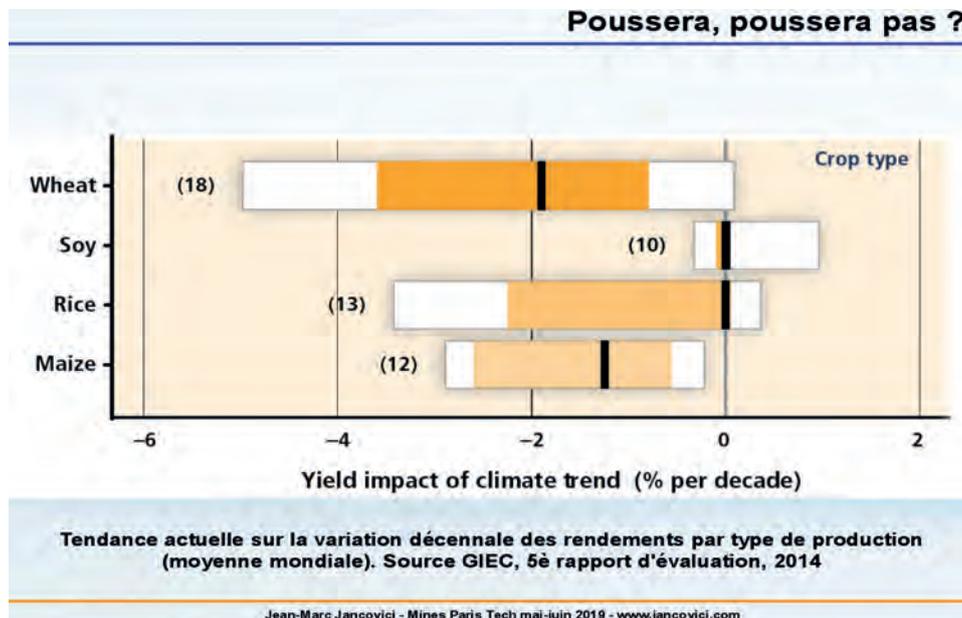
A propos des écosystèmes sauvages.

Plage de migration possible des espèces (arbres, plantes herbacées, mammifères à sabots fendus, mammifères carnivores, rongeurs, primates, insectes se nourrissant de plantes, mollusques d'eau douce) en km par décennies.

Quelles espèces sont capables de suivre la remontée (en ° de latitude, poussée vers les pôles) des températures ? Sachant que

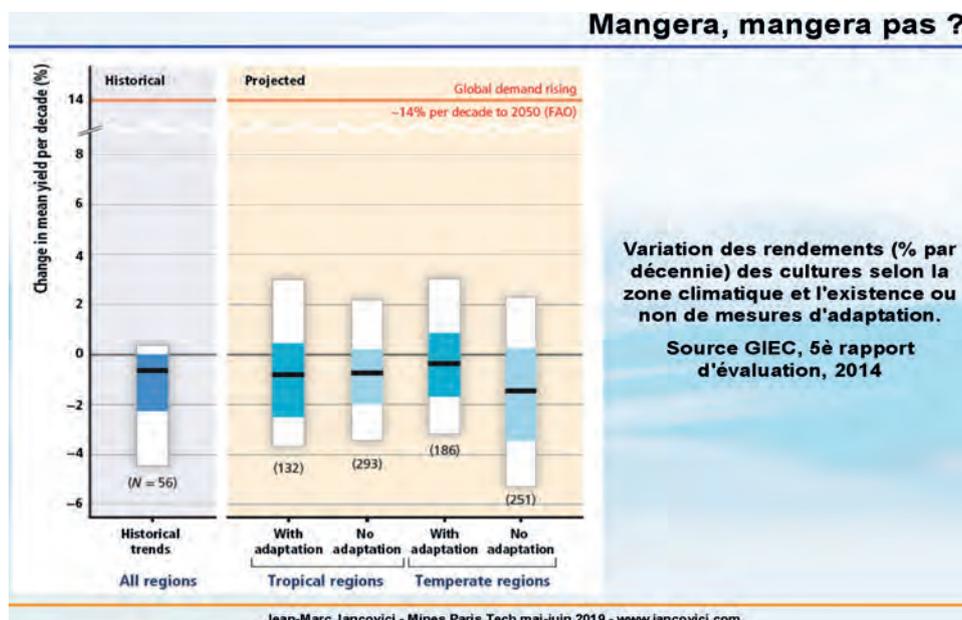
les températures s'élèvent plus vite dans les plaines (explication : là où il y a du relief les espèces peuvent se réfugier en altitude) ?

- pour les arbres, les scénarii RCP 4.5 et 6.0 excèdent de beaucoup leur vitesse de déplacement moyenne. C'est logique : la maturité d'un arbre prend plusieurs décennies, par exemple 40 ans = 1 génération pour les chênes. L'essentiel des forêts est appelé à disparaître dans ces scénarii.
- pour la base des écosystèmes, c'est-à-dire les plantes, la vitesse de migration est très inférieure à la vitesse de déplacement des paramètres climatiques à venir. Conséquence : la perte d'écosystèmes.



A propos des écosystèmes dirigés.

La tendance actuelle par décennies de la variation des rendements agricoles : dès aujourd'hui la production de blé et de maïs montrent une tendance à la baisse des rendements agricoles.



Prévisions sur la variation des rendements (% par décennies) des cultures :

- selon la zone climatique
- et selon l'existence ou non de mesures d'adaptation

On s'attend à une tendance à la décroissance des rendements agricoles, même en prenant des mesures adaptées au dérèglement climatique dans les régions tempérées (d'ailleurs difficilement applicables car

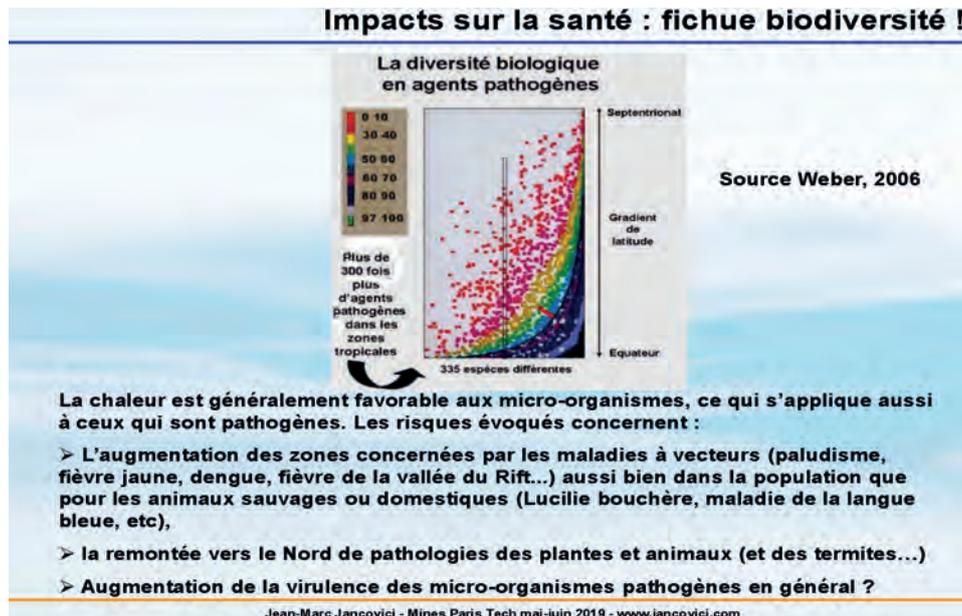
cela comprend des infrastructures d'irrigation).

Conséquence prévisible (selon le vieux dicton "ventre affamé n'a point d'oreilles")

- dans un monde où la croissance de la population se poursuit
 - et où jusqu'en 2050, il est prévu 14% d'augmentation de la demande alimentaire par décennies
- > migrations, émeutes, révolutions, guerres, ...

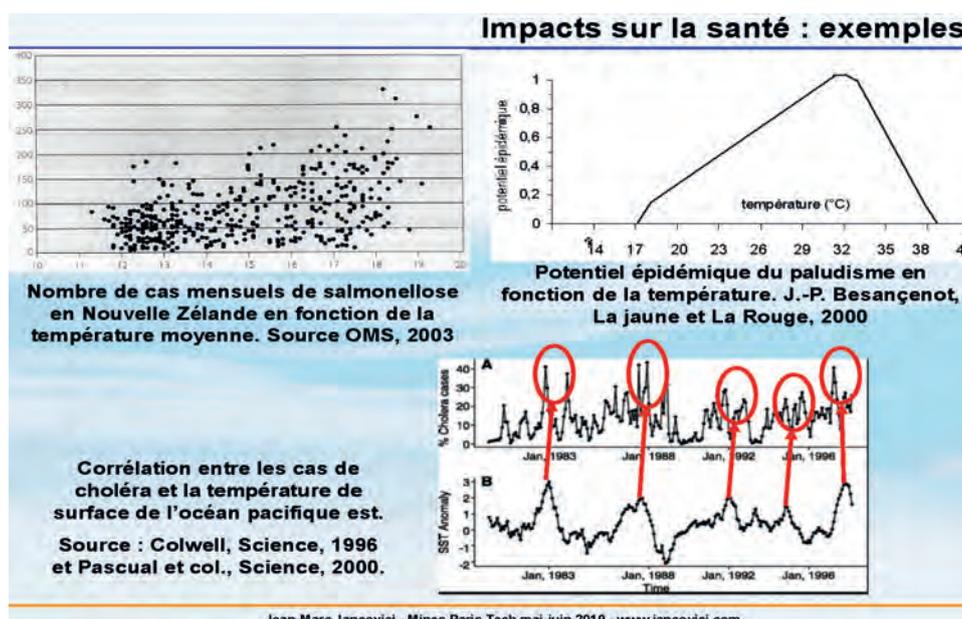
Les effets du dérèglement climatique vont s'intensifier au cours du XXI^e siècle, au moment où précisément l'énergie abondante fera défaut pour amortir les "accidents" (typiquement : réfrigération des denrées permettant d'amortir une année de mauvaises récoltes). Effet de tenailles entre intensification des processus et moindre capacité à y faire face.

D / Les impacts du changement climatique : santé humaine



Autre conséquence du réchauffement climatique : changement de la biodiversité microbienne et donc risques pour la santé. Les zones tropicales abritent 300 fois plus d'agents pathogènes que les zones tempérées.

- élargissement géographique des zones concernées par les maladies à vecteurs (paludisme, fièvre jaune, dengue, ...) et touchant tout le vivant, hommes et cheptels domestiques et animaux sauvages
- les maladies des plantes et des animaux vont remonter vers le nord avec le réchauffement global
- possible augmentation de la virulence des micro-organismes pathogènes en général ?



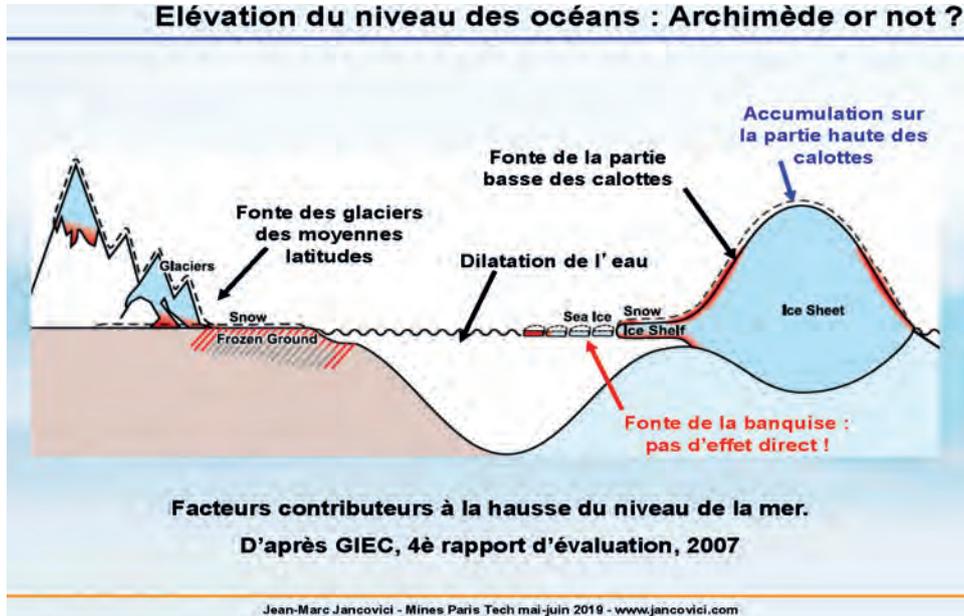
Exemples de pathologies et des effets de l'augmentation de température :

- Salmonellose

- Paludisme
- Choléra. Exemple les cas de choléra au Bangladesh augmentent parallèlement à l'augmentation de la température de surface du Pacifique-est (= el niño)

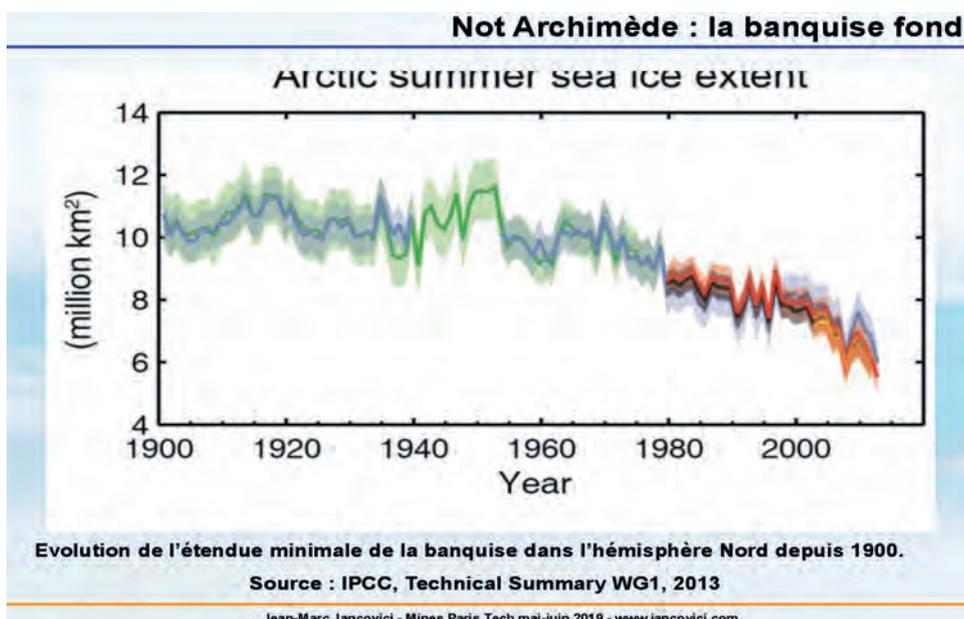
Mécanisme : el niño modifie le régime des pluies et provoque l'augmentation des eaux saumâtres (eau constituée d'un mélange d'eau douce et d'eau de mer) au Bangladesh, ce qui favorise le développement du vibrio du choléra.

E / Les impacts du changement climatique : la montée des océans



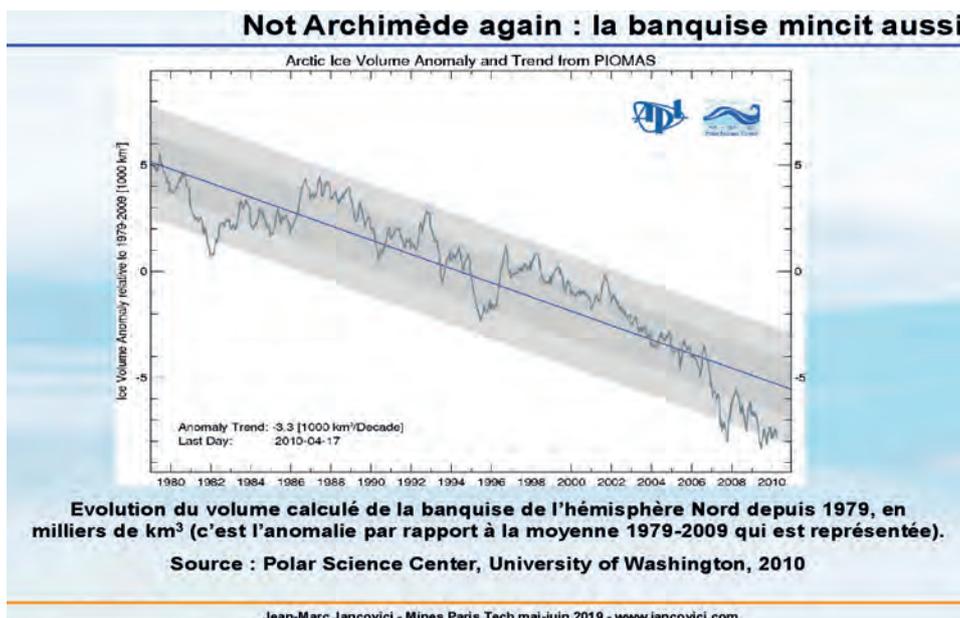
Autre conséquence du réchauffement global : l'élévation du niveau de la mer Ce qui fait varier le niveau de la mer :

- la quantité de chaleur emmagasinée par la mer augmente, elle se dilate (l'eau chaude occupe plus de volume que l'eau froide)
- la fonte des glaciers (exemple la fonte vertigineuse de la Mer de glace, plus grand glacier français près de Chamonix)
- la fonte des calottes glaciaires est plus complexe à estimer : la base tend à fondre tandis qu'en altitude (à 3000 mètres) la neige accumulée tend à "reprendre" de l'eau à la mer. Aujourd'hui la tendance est à la fonte plus rapide de la base et donc à la contribution des calottes glaciaires à la hausse du niveau de la mer
- la fonte de la banquise n'a pas d'impact direct sur le niveau de la mer (théorème d'Archimède). Toutefois en substituant une matière réfléchissante par de l'eau de mer, une matière "sombre" particulièrement absorbante de chaleur, la fonte de la banquise contribue indirectement au réchauffement climatique et à la fonte accélérée de la calotte.

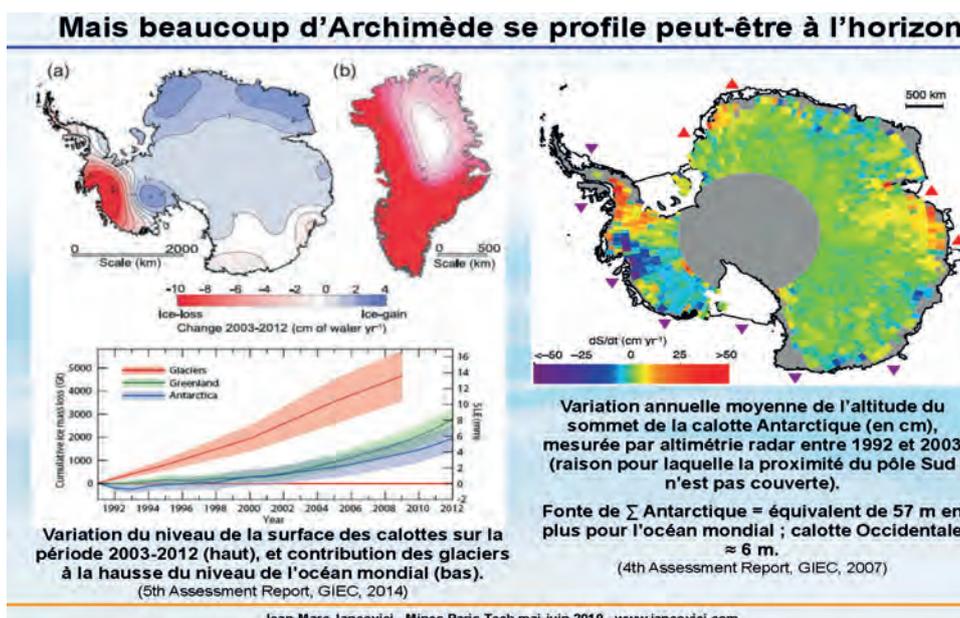


L'étendue minimale de la banquise ne cesse de décroître (de 10 millions de km² au milieu du XXe siècle à moins de 6 millions au-

aujourd'hui, divisée par 2 en 1 siècle), ce n'est qu'un début et directement lié au réchauffement global et parce que le phénomène est particulièrement marqué en Arctique.



La banquise diminue non seulement en superficie mais également en épaisseur. L'épaisseur de la banquise est connue depuis les années 1970 du fait des mesures militaires (passage des sous-marins nucléaires)

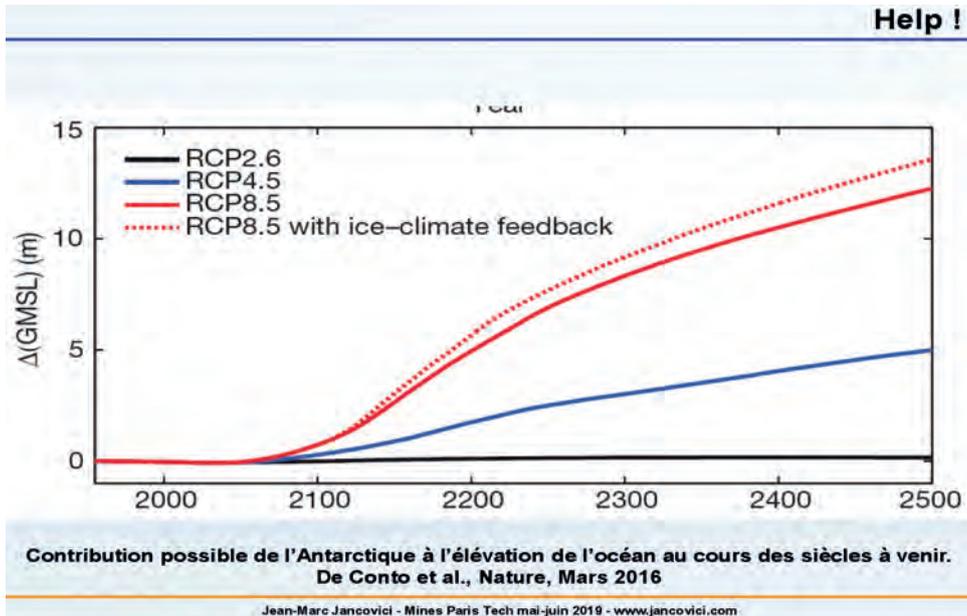


Du point de vue de la montée du niveau de la mer, la fonte des calottes est de loin le problème le plus préoccupant. Processus qui s'emballe puisque lorsque la calotte fond :

- son sommet perd en altitude, il est moins susceptible de se régénérer par l'accumulation de neige
- le sommet accumule alors davantage les poussières apportées par le vent (la neige fond, les poussières restent) qui absorbent les rayons solaires
- et parallèlement la fonte de la banquise qui seing la calotte contribue à chauffer l'eau environnante et donc à amplifier la fonte de la calotte

La calotte du Groenland a commencé à fondre (mesures satellitaires de l'épaisseur de la calotte) et est partie pour disparaître partiellement ou totalement dans les siècles à venir.

S'agissant de l'Antarctique, la partie ouest du continent a commencé à perdre du volume. Cette partie de l'Antarctique repose sur un socle rocheux sous-marin "déversant" (plus on s'éloigne de la côte, plus l'épaisseur de glace diminue). Dans cette configuration en pente, chaque glacier agit comme un arc-boutant pour celui qui se situe au-dessus. En quelques siècles et avec un réchauffement de +2°, il existe une possibilité de disparition de l'Antarctique de l'ouest.



Contribution des différentes sources d'élévation du niveau de la mer avec le scénario modéré d'un réchauffement de 2° :

- Antarctique 5 mètres en 5 siècles
 - Groenland 3 à 6 mètres sur la même période
 - 1 mètre de plus du fait de la dilation de l'eau de mer réchauffée
- ... le trait de côte ne sera plus le même.

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



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



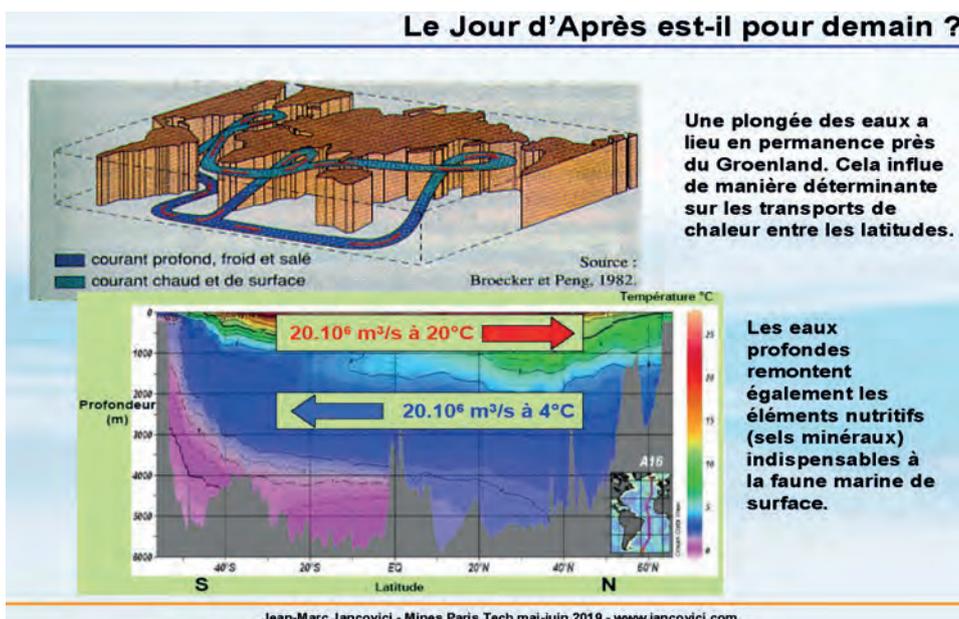
La question de la rapidité de la montée de la mer est discutée. Aucune garantie que le phénomène ne soit pas constaté à l'échelle des décennies plutôt que des siècles.

Montée de la mer problématique :

- forte activité économique sur le littoral (ports avec leurs infrastructures proche de la ligne de flottaison, raffineries pour stocker le pétrole acheminé par tankers, nombreuses centrales électriques situées en bord de mer pour leur refroidissement, une bonne partie des silos agricoles pour stocker les céréales acheminés par vraquiers...)
- forte démographie littorale

Le phénomène de la montée des eaux ne se manifesterait pas de manière douce et continue. Ce sera à l'occasion de phénomènes climatiques discontinus et violents, de tempêtes extrêmes et / ou inondations hivernales cumulées, que les défenses habituelles seront submergées et il ne sera pas possible de reconstruire à chaque débordement.

F / Impact du réchauffement climatique sur la circulation des courants océaniques



Conséquence supplémentaire du réchauffement climatique : la modification à large échelle de la circulation des courants océaniques.

Du fait des alizés qui poussent en permanence l'eau dans le même sens au niveau de l'équateur et de la force de Coriolis, il y a un grand mouvement de circulation dans les océans :

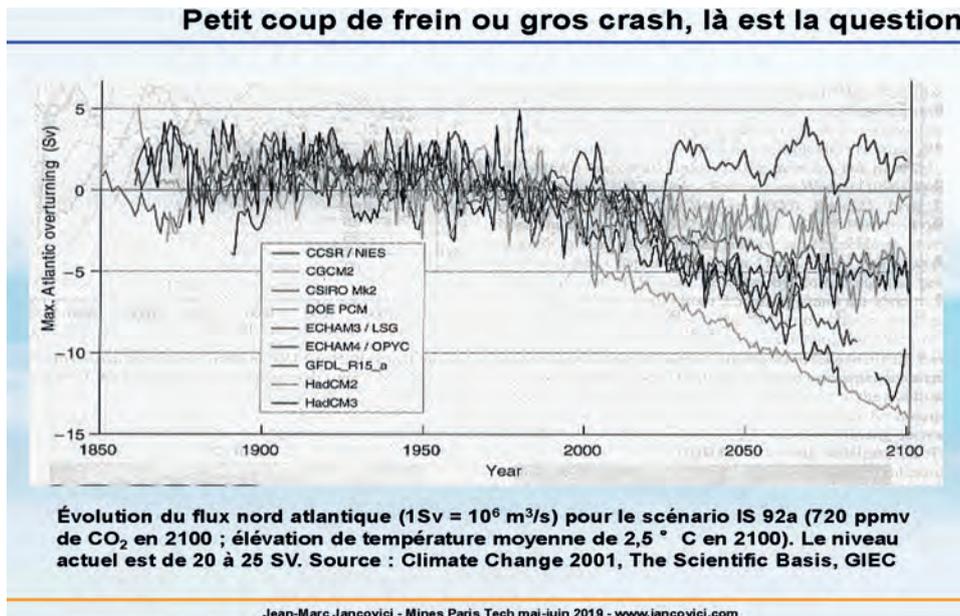
- est / ouest en surface, avec un contournement de l'Afrique par le sud
- ouest / est en profondeur, avec une plongée de l'eau au sud du Groenland

Au Groenland, l'eau est particulièrement froide et salée, c'est-à-dire particulièrement dense. L'eau y est enrichie en sel notamment en raison du processus de formation de la banquise (il s'agit d'eau salée glacée mais moins salée que l'eau de mer, en se formant la banquise expulse du sel en mer).

Particulièrement froide et salée, l'eau plonge vers les profondeurs et crée un siphon qui permet de comprendre que :

- la dérive nord-atlantique remonte jusqu'au sud du Groenland
- le réchauffement est moins marqué au sud du Groenland (l'enfouissement de la chaleur de surface agit comme une pompe à chaleur, phénomène unique sur le globe)

La question qui taraude les climatologues : est-ce que cette plongée dans les eaux profondes peut être affectée par le dérèglement climatique ? Si oui, le refroidissement au sud du Groenland disparaît.



Question de l'affaiblissement de cette circulation océanique. Oui, car le réchauffement climatique n'est pas distribué de manière uniforme :

- réchauffement des tropiques moins important que le réchauffement de l'Arctique
- amoindrissement de la différence de température entre les tropiques et l'Arctique
- affaiblissement de la force de circulation

Les simulations du GIEC montrent que le débit de la dérive Nord-atlantique va baisser progressivement (entre -5 et -10 millions de m³ / seconde d'ici la fin du XXI^e siècle).

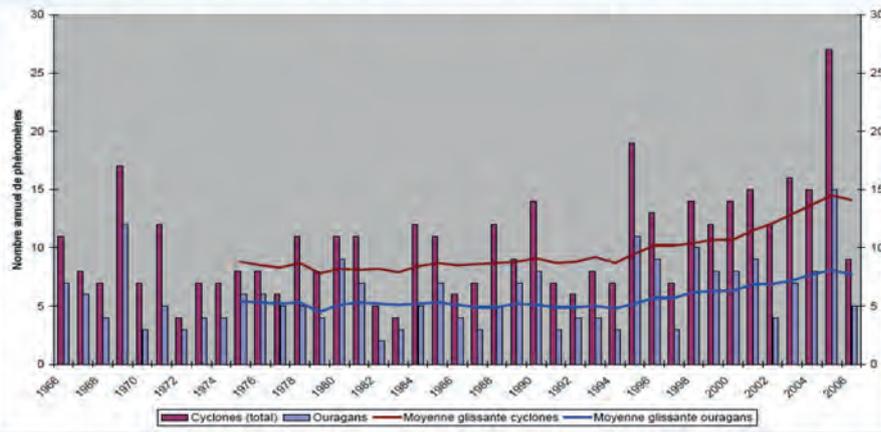
Des épisodes connus d'arrêts brutaux de la dérive Nord-atlantique :

- en période glaciaire
- au moment d'énormes débâcles d'icebergs qui - en charriant de grandes quantités d'eau douce - ont fait chuté la densité de l'océan Nord-atlantique et interrompu le siphon

Ces épisodes très brutaux sont constatés dans l'évolution très sensible de la végétation en quelques dizaines d'années, à partir des pollens retrouvés dans les carottages des sédiments près des côtes.

G / Impact du changement climatique sur l'intensification des phénomènes météorologiques extrêmes

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



Evolution du nombre de cyclone sur l'Atlantique tropical de 1966 à 2006. Source Météo France

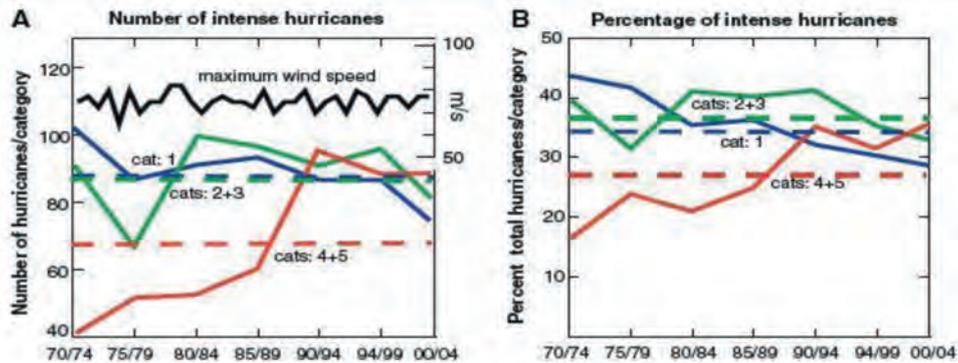
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Autre conséquence : l'intensification des phénomènes météorologiques extrêmes. Processus déjà à l'œuvre aujourd'hui.

Explication physique : pompe convective qui s'intensifie du fait

- d'une différence de température accrue entre une surface terrestre (troposphère) chaude / réchauffée et une stratosphère froide / refroidie
- de l'évaporation qui augmente

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

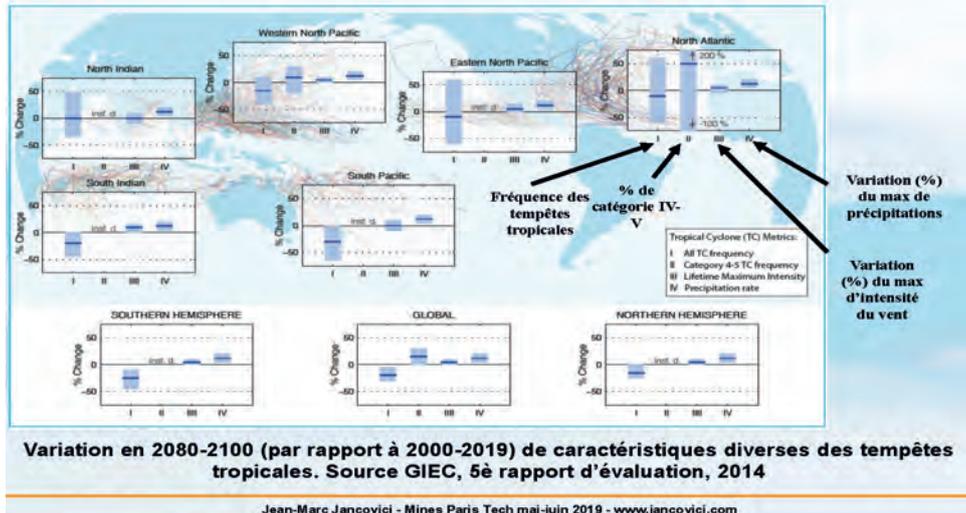


Evolution sur 30 ans du nombre de cyclone dans le monde par catégorie (gauche), et proportion de chaque catégorie dans le total (droite). Source Science, 2005

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Le nombre de cyclones dans l'Atlantique nord a une légère tendance à augmenter mais c'est surtout leur intensité qui a tendance à fortement s'accroître. Les cyclones de Catégories 4 et 5 (les plus violents) ont sensiblement augmenté durant les dernières décennies (40 en 1970, plus de 90 en 2000).

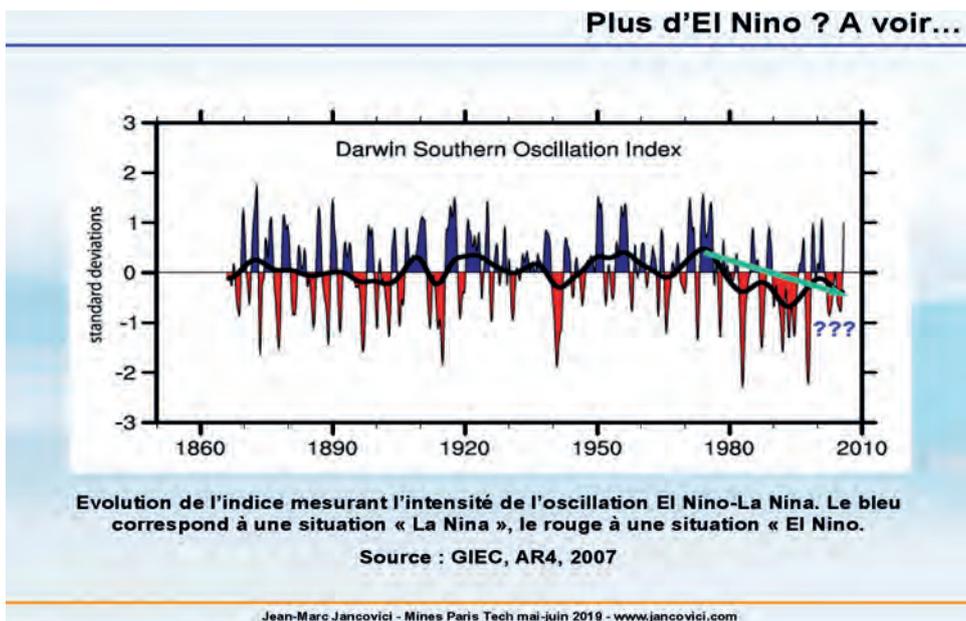
Tourne (et monte) Marcel



Les prévisions confirment les tendances observées dès aujourd'hui.

- les précipitations et le vent vont s'intensifier
- pas nécessairement plus de cyclones (cela dépendra des régions) mais quand ils se formeront ils seront en moyenne plus destructeurs

Plus d'El Nino ? A voir...



Interrogations à propos de l'oscillation El niño / La niña. Va-t-elle être modifiée par le réchauffement climatique ? Difficile de trancher même si on constate dans les dernières décennies :

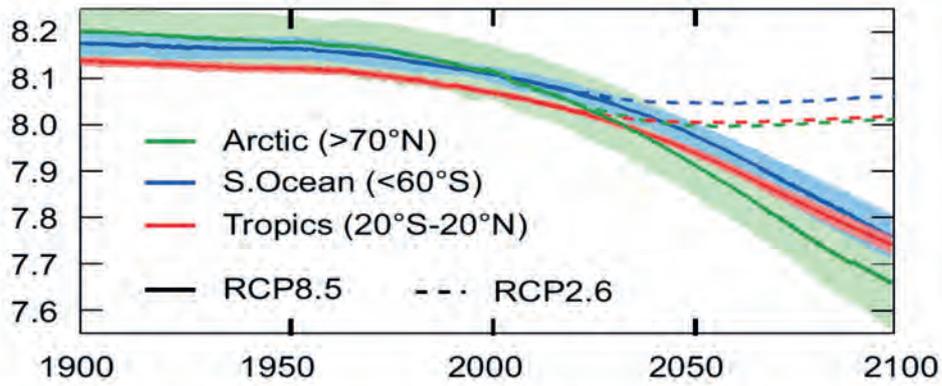
- moins de situations El niño (les côtes du Chili, du Pérou et de l'Équateur sont baignées par le courant froid de Humboldt)
- plus de situations El niño (températures anormalement élevées de l'eau dans la partie est de l'océan Pacifique sud, se déclenche fin décembre en principe, pour une durée de 9 mois à 2 ans et tous les 2 à 7 ans)

Plus El niño et La niña sont intenses, plus les phénomènes extrêmes sont importants et peuvent

- dérouter les cyclones tropicaux de leurs routes habituelles, y compris la mousson,
- déplacer les zones de précipitations et de sécheresse

H / Impact du changement climatique : l'acidification des océans

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

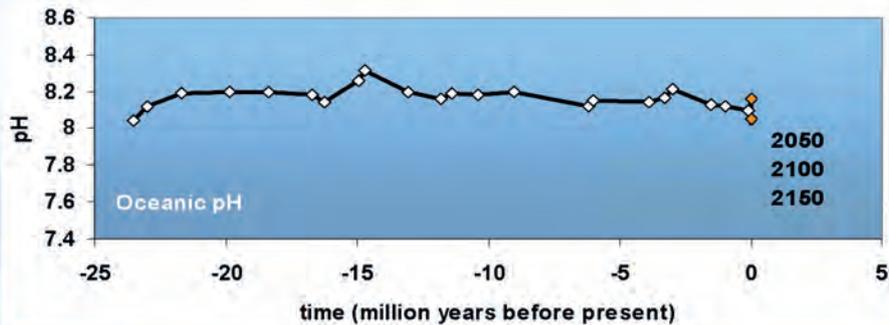
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Autre conséquence du dérèglement climatique : l'acidification de tous les océans.

Phénomène physique :

- une partie du CO₂ supplémentaire passe dans l'océan (= équilibrage de pression partielle)
- réaction du CO₂ et formation d'hydrogénocarbonate et d'ion H⁺ qui va acidifier l'eau

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



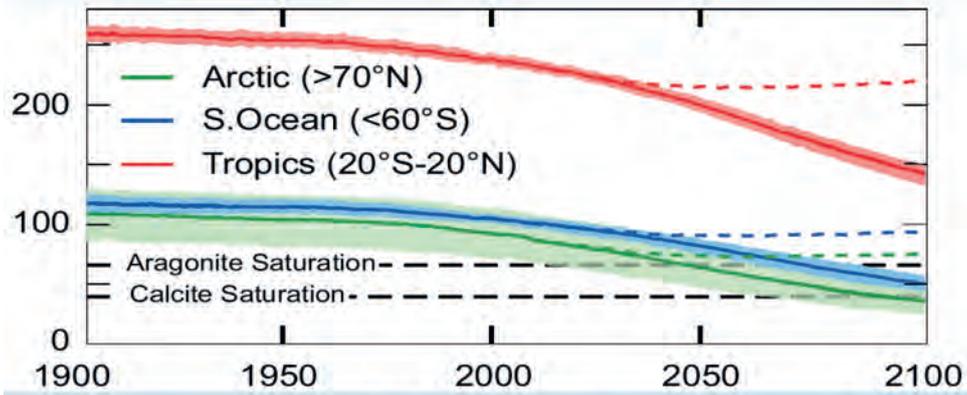
Variation du pH de l'océan reconstruite depuis 24 millions d'années, et évolution possible à l'avenir.

Source Turley et al. 2006

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

La stabilité du Ph des océans est une constante depuis 25 millions d'années. Les changements apportés aujourd'hui avec le supplément de CO₂ est extrêmement disruptif. Les modifications prévues sont très brutales à l'échelle des temps géologiques.

Moins de calcaire produit = pas de pot pour les coraux

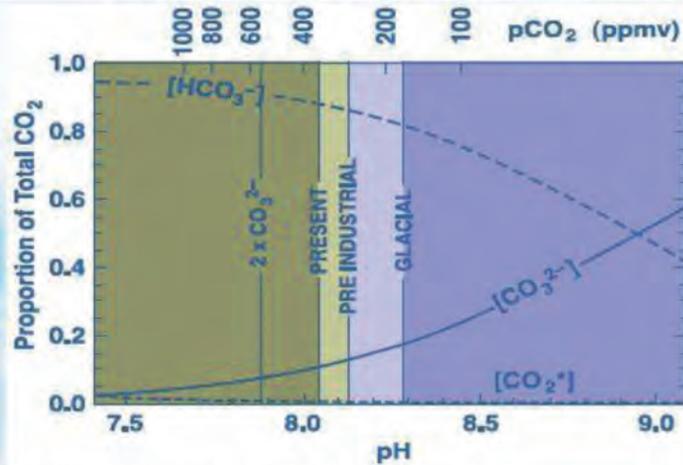


Concentration océanique en ions CO_3^{2-} ($\mu\text{moles par kg}$) en fonction de la concentration atmosphérique en CO_2 . Source IPCC, 5^e rapport d'évaluation, 2014

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

L'acidification des océans sera fatale à plusieurs espèces vivantes à commencer par les coraux mais également les planctons qui ont besoin de synthétiser du calcaire (de l'aragonite, non pas le calcite qui est l'autre forme du calcaire). L'aragonite est utilisée par les formes de vie planctoniques qui se forment des coquilles. Si ces espèces de planctons ne parviennent plus à former ces coquilles, elles disparaissent.

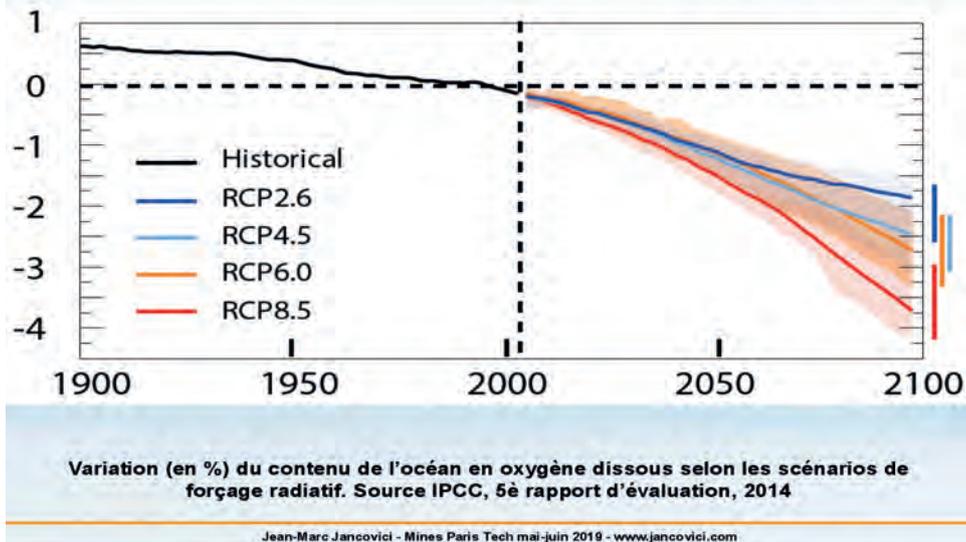
Un océan plus acide = moins de calcaire produit



Proportions respectives de carbonates et de bicarbonates en fonction du pH. Dans un océan plus acide, la disponibilité en carbonates diminue.

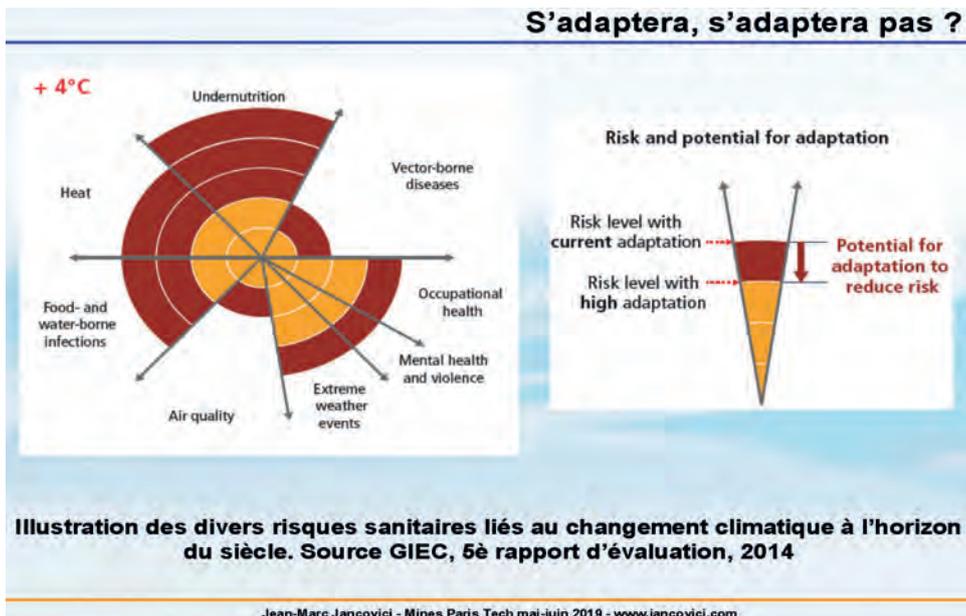
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Dissous, ou pas dissous ?



I / Impact du changement climatique pour l'espèce humaine

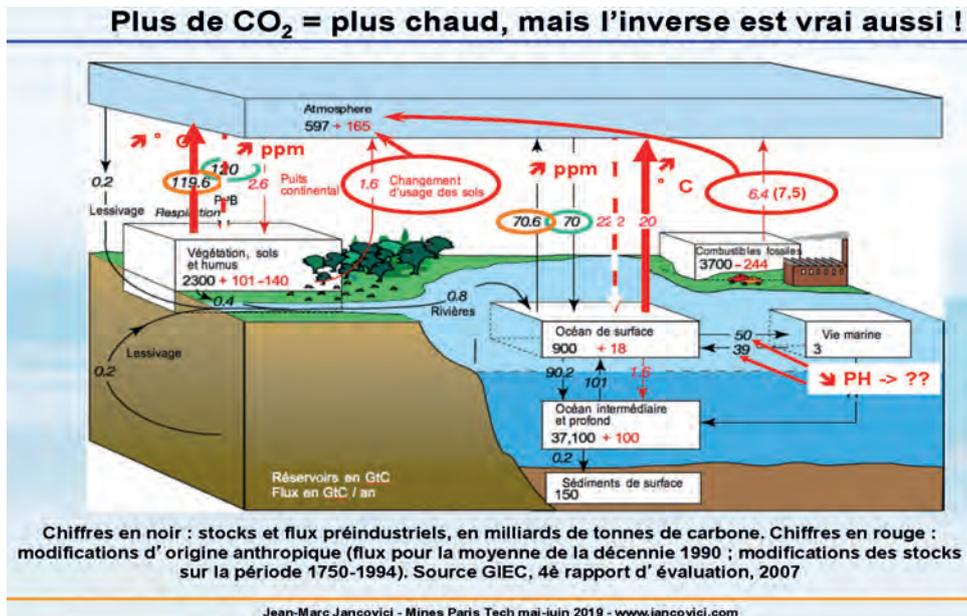
S'adaptera, s'adaptera pas ?



Les risques pour l'espèce humaine.

- malnutrition
- maladie à transmission vectorielle
- santé au travail
- santé mentale et violence
- événements météorologiques extrêmes
- qualité de l'air
- infections d'origines alimentaire et hydrique
- chaleur

Peuvent être classés en risques directs (événements climatiques...) et indirects (géopolitiques...)



Asservissement du cycle du carbone et du climat

En situation préindustrielle

- L'océan échange du carbone avec l'atmosphère car la capacité à dissoudre du carbone est plus élevée quand l'eau est froide. Partout où se trouvent des courants qui refroidissent l'eau, se produit un flux descendant de CO₂. Exemple : la dérive Nord-atlantique est une pompe à CO₂, au contraire du courant du Labrador au nord du Canada qui est un émetteur de CO₂.
- Le cycle de la végétation est un deuxième vecteur d'échange de carbone. Pour croître les plantes prélèvent du carbone sous forme de CO₂ dans l'atmosphère, CO₂ qui est restitué à l'atmosphère sous forme de respiration (des animaux microscopique via la décomposition ou macroscopique)

Action des hommes

- déforestation
 - déstockage de combustibles fossiles
- ... c'est-à-dire on prend du carbone qui se trouve dans un stock (végétation ou sous-sol) pour le placer dans l'atmosphère

L'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère provoque

- l'augmentation de sa température
- l'augmentation de la surface de l'eau
- renvoie davantage de CO₂ dans l'atmosphère

Pour les échanges atmosphère / océan

Puisqu'il y a plus de CO₂ dans l'atmosphère que dans l'océan en pression partielle, on crée un flux descendant de CO₂ de l'atmosphère vers l'océan. Actuellement les deux s'équilibrent.

Pour les échanges atmosphère / surface émergées

Puisqu'il y a plus de CO₂ dans l'atmosphère, il y a plus de nourriture pour les plantes (accroissement de la photosynthèse). Mais en même temps l'augmentation de la température favorise le développement micro- bien, donc l'émission de CO₂ par les terres émergées.

A plus ou moins long terme sur les surfaces émergées

L'augmentation de température va s'intensifier, intensification de l'émission de carbone par les sols et

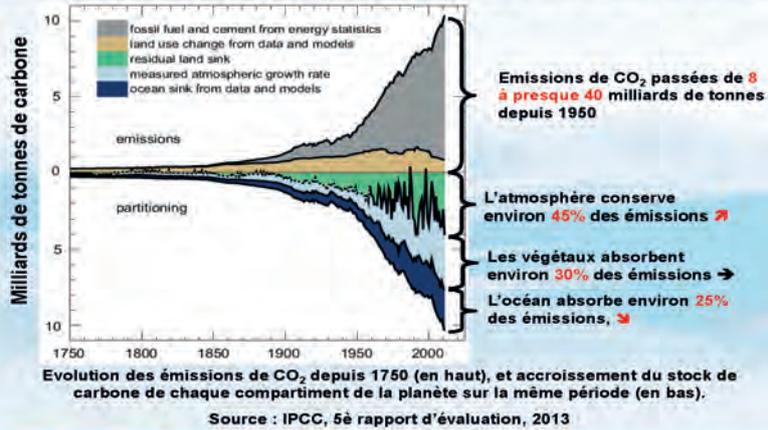
affaiblissement de la photosynthèse (les écosystèmes vont de plus en plus mal supporter l'élévation de température et le stress hydrique).

A plus ou moins long terme dans les océans

Intensification du CO₂ rejeté par l'eau en même temps que le flux descendant (enfouissement du CO₂ dans l'océan) va se réduire.

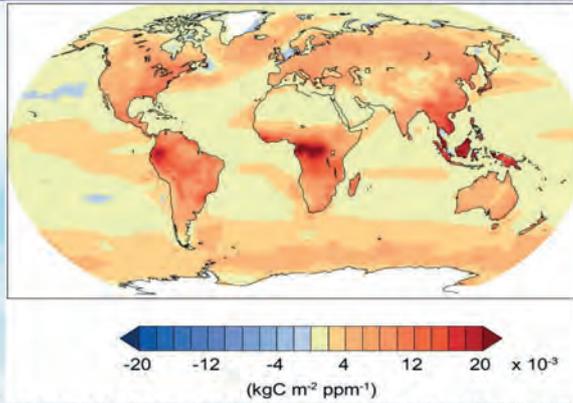
Ensemble de rétroactions positives qui affecte le système climatique, qui a donc la capacité à "s'emballer" à cause de la rétroaction du climat sur le cycle du carbone. Le système climatique trouvera son point d'équilibre mais rien n'assure que ce point soit compatible avec l'écosystème existant.

Le CO₂ dans l'air : un petit tour et puis s'en va... ou pas ?



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

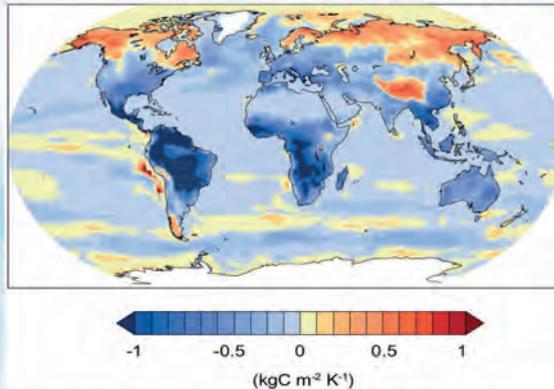
Mets la pression ! (partielle)



Réponse du flux net de carbone vers le sol par ppm additionnel de CO₂ (à climat constant).
Source IPCC, 5^e rapport d'évaluation, 2014

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

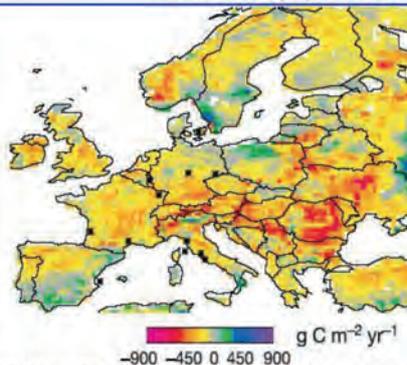
L'amortisseur amortit un peu moins bien



Réponse du flux net de carbone vers le sol par K de température additionnelle. Source IPCC, 5^e rapport d'évaluation, 2014

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Le déstockage est-il pour bientôt ?

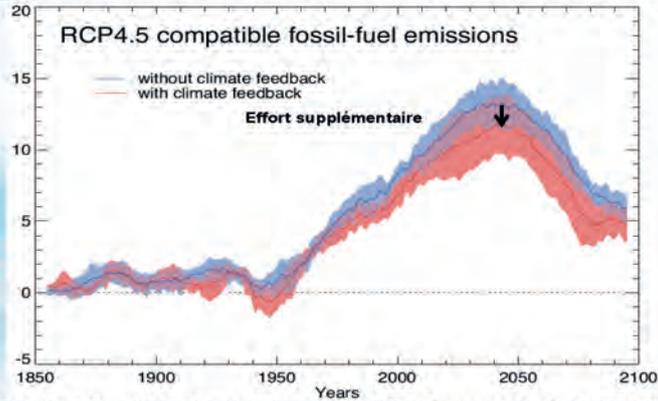


Comparaison de la productivité primaire nette des écosystèmes en 2003 avec la moyenne 1998-2002. Quasiment partout le flux descendant s'est affaibli, et en 2003 les écosystèmes européens ont « recraché » 4 ans de « pompage » du CO₂

Source Ciais et al., Nature, septembre 2005

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

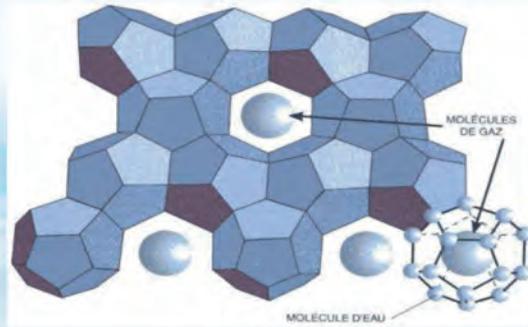
Et l'ingénieur devra bosser un peu plus



Trajectoire maximale pour les émissions pour limiter le forçage radiatif. Source IPCC, 5^e rapport d'évaluation, 2014

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

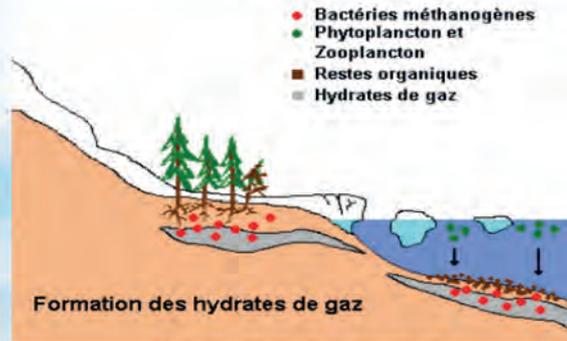
Encore plus fort : les hydrates de méthane



Structure d'un hydrate de méthane

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Les hydrates de méthane, c'est où ?

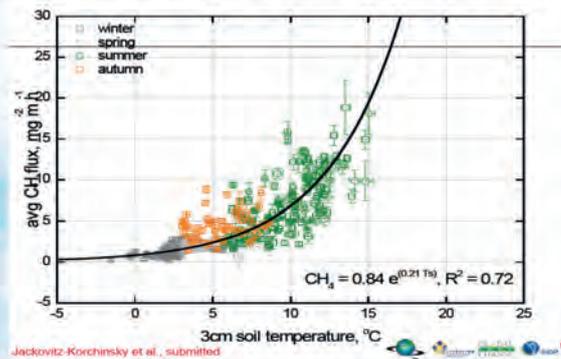


Formation des hydrates de gaz

Formation des hydrates de méthane

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Plus chaud (et plus humide), le CH₄ aime aussi



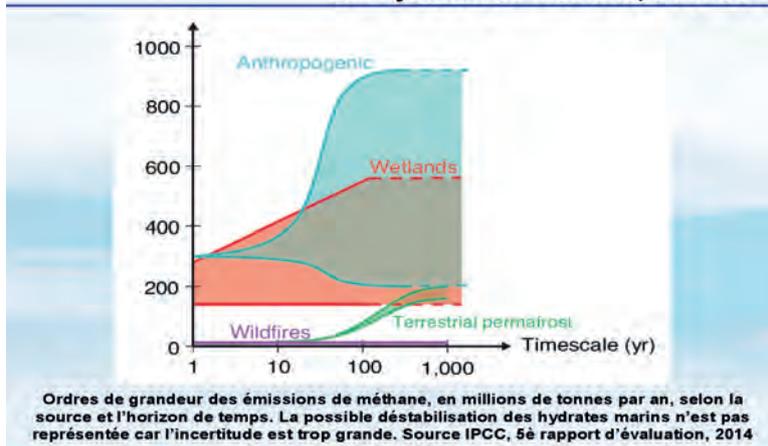
Jackovitz-Korchinsky et al., submitted



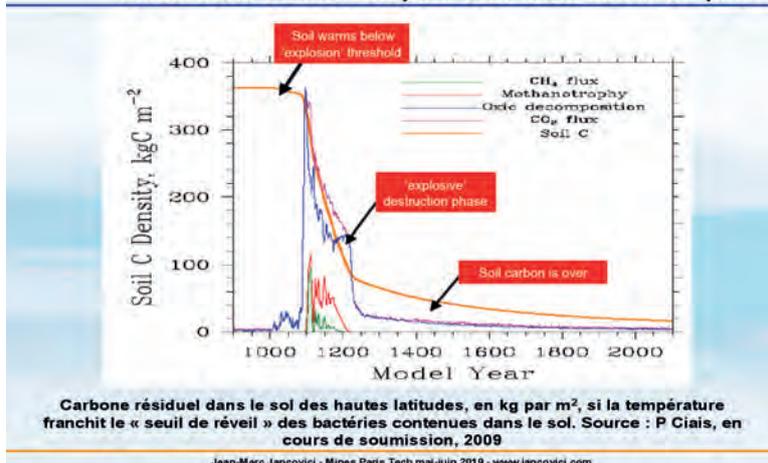
Emissions de CH₄, en mg par m² et par heure, en fonction de la température du sol (3 cm sous la surface). Source sur le graphique.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

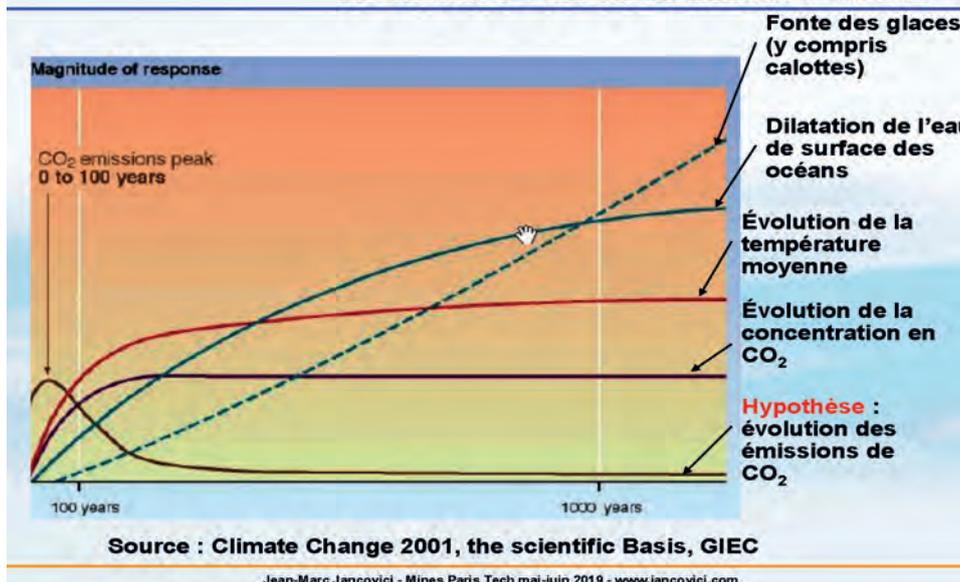
Les hydrates de méthane, c'est où ?



Le carbone du sol : un petit tour dans l'air... ou pas ?



Au secours ! Où est le bouton « reset » ?



Echelonement dans le temps des différents processus :

- évolution des émissions de CO₂ (augmentation au début puis diminution du fait de la limitation du stock des combustibles fossiles)
- fonte des glaces (continuera pendant des milliers d'années après le pic des émissions)
- dilatation de l'eau de surface des océans (continuera pendant des milliers d'années après le pic des émissions)
- évolution de la température moyenne (augmentation continuera à augmenter longtemps après le maximum des émissions atteint)
- évolution de la concentration en CO₂ (chimiquement stable, reste stable durant des siècles et atteint son maximum bien après la diminution des émissions)

Pas de possibilité de "guérir". On peut prévenir, s'adapter en partie, mais on ne peut pas guérir dans le sens où on ne peut pas se

débarrasser de la cause de la maladie.

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

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

- processus de dérèglement climatique ira croissant, avec son lot de mauvaises surprises imprévisibles
- ce qui peut être entrepris aujourd'hui c'est amortir les conséquences du dérèglement climatique pour la génération future
- l'accès à l'énergie va se raréfier au moment même où celle-ci sera le plus nécessaire pour faire face aux effets du dérèglement climatique. La capacité de réponse aux problèmes posés par le dérèglement climatique va avoir tendance à s'affaiblir avec le temps.
- l'affectation des ressources énergétique devrait être revue