

# Monde et environnement

## Sommaire

### Introduction

### A La machinerie climatique

#### I Les données du problème

#### II Eléments constitutifs du climat

##### 1 – Eléments astronomiques

a) L'activité solaire

b) Les cycles de Milankovic

$\alpha$  - Le cycle orbital

$\beta$  - L'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre

$\gamma$  - Le cycle de la précession axiale

$\delta$  - Quelques considérations supplémentaires

##### 2 – Eléments terrestres

a) Mouvements tectoniques

b) L'albédo et la nébulosité

c) Volcanisme et aérosols

d) Vents et courants

$\alpha$  - La circulation atmosphérique

$\beta$  - La circulation océanique

e) Le facteur biotique

#### III Les caractéristiques du système

### B La problématique actuelle

#### I La polémique

#### II Réalité de l'effet de serre additionnel

#### III Données numériques et physico-chimiques

#### VI Fragilité de l'assise humaine

1) Répartition géographique des populations

2) Le problème de la sécurité alimentaire

### C Esquisse d'une réflexion philosophique

### Conclusion

## Monde et environnement

### Introduction

La déstabilisation climatique globale, du fait de notre impuissance actuelle à maîtriser nos émissions de gaz à effet de serre, constitue une hypothèse de plus en plus plausible.

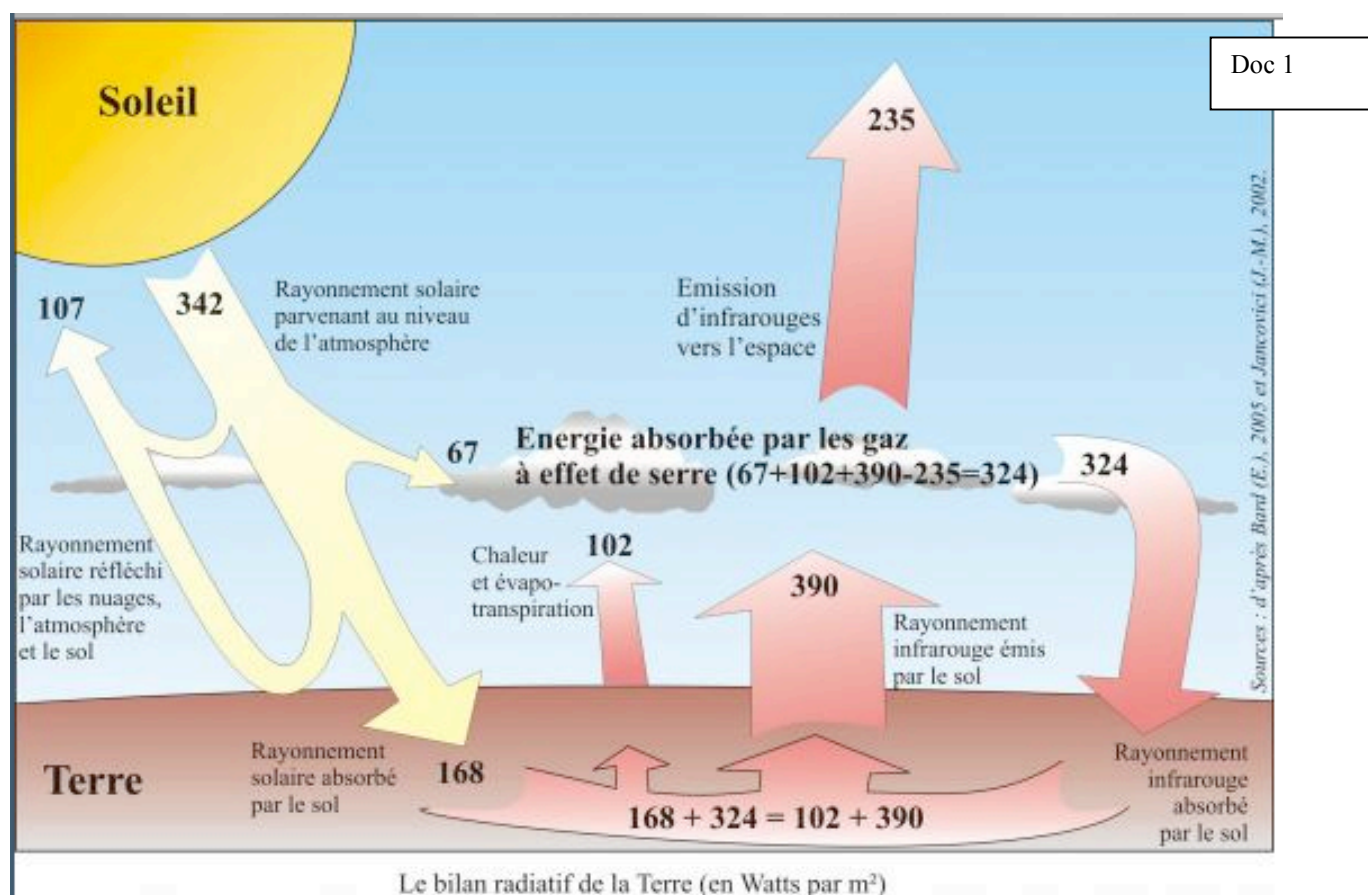
Cette éventualité fait peser de sérieuses menaces sur l'avenir de l'humanité ; c'est donc elle qui nous enjoint de réfléchir

- d'une part à ce qu'est notre monde et à son fonctionnement,
- d'autre part à la place que nous y occupons et à la façon dont nous interagissons avec lui.

Une telle réflexion, que nous nous contenterons d'aborder, devra en particulier

- préciser et évaluer la nature et l'origine des risques encourus
- définir les conditions d'une action salvatrice.

A cet égard il faudrait se demander quels seraient les axes d'une recherche plus spécifiquement philosophique.



## A La machinerie climatique

### I Les données du problème.

Une partie du rayonnement solaire reçu par la Terre est conservée par elle : une autre est renvoyée vers l'espace. (Doc 1)

L'énergie solaire absorbée par les surfaces continentales et océaniques est en partie conservée par les continents et les océans, en partie réémise dans l'atmosphère. Elle est alors majoritairement conservée par elle ; c'est l'effet de serre naturel. Sans lui, la température moyenne de la surface du globe serait de  $-18^{\circ}\text{C}$ , au lieu des  $+15^{\circ}\text{C}$  actuels, rendant impossibles la plupart des formes de vie.

L'agent principal de l'effet de serre naturel est la vapeur d'eau qui piège les 2/3 des infrarouges réémis par les surfaces terrestres et dont la quantité est régulée par la condensation, les précipitations et la chaleur de l'atmosphère.

Des composés carbonés, en très faible concentration dans l'atmosphère actuelle<sup>1</sup>, captent les infrarouges dans les longueurs d'onde restantes.

Or depuis 150 ans l'industrie, les transports et l'agriculture expulsent dans l'atmosphère des quantités croissantes de composés carbonés ; c'est l'effet de serre additionnel ou anthropique. (Doc 2)

Doc 2

Principaux gaz à effet de serre additionnel <sup>2</sup>:

- dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)  
Contribution à l'ESA<sup>3</sup> : 49% ; durée de vie dans l'atmosphère : 15 ans
- méthane (CH<sub>4</sub>)  
Contribution à l'ESA: 18% ; durée de vie dans l'atmosphère : 10 ans  
Efficacité comparée <sup>4</sup> : x 21
- protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O)  
Contribution à l'ESA: 4 % ; durée de vie dans l'atmosphère : 150 ans  
Efficacité comparée : x 2 000
- ozone dit troposphérique (O<sub>3</sub>)  
Contribution à l'ESA: 15 % ; durée de vie dans l'atmosphère : 1 mois  
Efficacité comparée : x 206
- chlorofluorocarbures<sup>5</sup> (CFC)  
Contribution à l'ESA : 1% ; durée de vie dans l'atmosphère : 100 ans  
Efficacité comparée : x 15 000

<sup>1</sup> Celle-ci a commencé à se mettre en place il y a 1 milliard 300 millions d'années ; on considère qu'elle est la 3<sup>e</sup> de l'histoire de la Terre.

<sup>2</sup> Chiffres du rapport 2007 du GIEC

<sup>3</sup> Acronyme pour « Effet de serre additionnel »

<sup>4</sup> Elle est calculée en utilisant le dioxyde de carbone comme unité.

<sup>5</sup> Emissions interdites depuis le protocole de Montréal mais qui vont encore demeurer actives pendant des décennies. Par ailleurs les hydrofluorocarbures qui les ont remplacés sont inoffensifs pour l'ozone stratosphérique mais constituent, eux aussi, de puissants gaz à effet de serre.

On notera le temps de séjour globalement long de ces molécules dans l'atmosphère et l'efficacité importante de la plupart d'entre elles.

Que faut-il attendre de ces émissions ?

Pour le comprendre une analyse préalable de la machinerie climatique est requise.

## II Eléments constitutifs du climat

La caractéristique majeure du climat est la complexité des interactions dont il est la résultante. Comme l'exposé ne peut être qu'analytique, nous établirons en chemin le lien avec des composantes non encore abordées ou abordées précédemment.

### 1 – Eléments astronomiques

#### a) L'activité solaire

Elle est variable. On pense discerner en particulier

- un cycle de 90 ans
- un cycle combiné de 11 ans en moyenne, dit « des taches solaires ». Le champ magnétique solaire, alors en augmentation, inhibe la circulation du magma entre le centre et la surface de l'étoile ; les taches correspondent donc à des zones de refroidissement. Mais paradoxalement le rayonnement solaire, plus riche en rayons X, est alors plus énergétique et ces cycles se traduisent par un réchauffement de la Terre.

Impact : les minima combinés d'activité peuvent induire des périodes froides longues.  
Ex : le « petit âge glaciaire » de 1550 à 1850. Faisant suite à l'optimum climatique médiéval, il commence par trois années de pluies diluviennes et se poursuit par une avancée record des glaciers. La Tamise, la Seine et les canaux de Hollande sont, en hiver, pris par les glaces

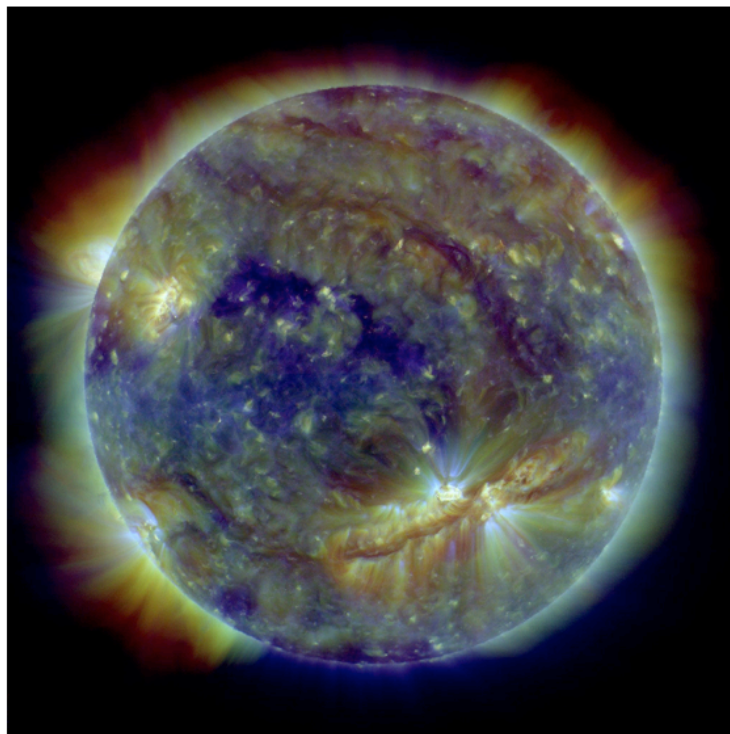
NB : on a prévu, à partir de 2011, une baisse d'activité de longue durée.

Cependant en 2009 les premières taches solaires du nouveau cycle sont apparues avec deux ans de retard sur la date prévue.

En fait le soleil est loin d'être la sphère ignée parfaite que l'on se plaît à imaginer (Doc 3).



Doc 3



NASA via A.F.P. 21 octobre 2010

Cette image de l'Observatoire de Dynamique Solaire\* de la NASA montre une tache solaire à croissance rapide (photographie initiale dans l'ultraviolet, avec couleurs restituées). On observe une structure géante de matériau fortement magnétisé, s'étirant sur 500 000 km (distance Terre / June : 384 402 km). Dans une autre direction, elle aurait pu perturber fortement les réseaux électriques et les réseaux de communication terrestres.

\* Solar Dynamics Observatory.

## b) Les cycles de Milankovic

Ils sont déterminés d'une part par la position relative de la Terre par rapport au soleil et aux autres planètes, d'autre part par sa position relativement au plan orbital.

### $\alpha$ - Le cycle orbital

Du fait de l'attraction exercée par les géantes du système solaire, Jupiter et Saturne, la Terre décrit une ellipse autour du soleil, du point le plus proche, le périhélie, au point le plus éloigné, l'aphélie, sur la durée approximative d'une année.

Cette ellipse oscille, d'année en année, entre le quasi cercle et la trajectoire la plus excentrique, sur une période résultante de 100 000 ans approximativement<sup>6</sup>.

Impact : la plus grande excentricité induit une variation annuelle de  $\pm 30\%$  de l'insolation entre le périhélie et l'aphélie. Cependant l'insolation totale sur une année varie peu et le cycle orbital se traduit principalement par une accentuation ou une atténuation des contrastes saisonniers.

<sup>6</sup> Elle résulte de 3 cycles combinés d'une durée respective de 95 000, 125 000, et 413 000 ans.

Actuellement, du fait de la composition du cycle orbital avec celui de l'axe de rotation, le périhélie a lieu vers le 3 janvier et l'aphélie vers le 4 juillet, ce qui atténue les contrastes saisonniers dans l'hémisphère nord (étés frais, hivers doux, en principe) et les renforce dans l'hémisphère sud.

Mais comme celui-ci est à 80% océanique, contre 60% pour le premier, et que les océans sont beaucoup plus efficaces que les continents dans la captation de l'énergie radiative du soleil, la combinaison actuelle constitue un facteur de réchauffement. Cependant le cycle orbital est actuellement régressif et les orbites les plus circulaires devraient être atteintes dans 24 000 ans, ce qui compense faiblement l'effet précédent.

### β L'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre

L'axe des pôles terrestres est incliné par rapport au plan orbital du système solaire. C'est cette inclinaison qui détermine la durée des jours et l'alternance des saisons dans chacun des deux hémisphères.

Mais l'inclinaison varie d'un angle allant de 20 à 24° par rapport à la perpendiculaire au plan orbital, ceci sur un cycle de 24 000 ans.

Impact : la phase progressive induit une accentuation des contrastes saisonniers. Mais surtout chacun des pôles reçoit davantage de rayonnements quand l'axe pointe vers le soleil, ce qui fait fondre plus efficacement la glace aux hautes latitudes. C'est pourquoi, dans l'ère actuelle, les fortes inclinaisons correspondent aux périodes interglaciaires.

Inversement, quand cette inclinaison est faible, les hivers sont moins froids mais les étés, moins chauds, ne suffisent plus à faire fondre la glace constituée en hiver et les glaciers s'étendent progressivement, préluant à une période glaciaire.

Actuellement cet angle est de 23° 27' et il est régressif, ce qui constitue un facteur de refroidissement.

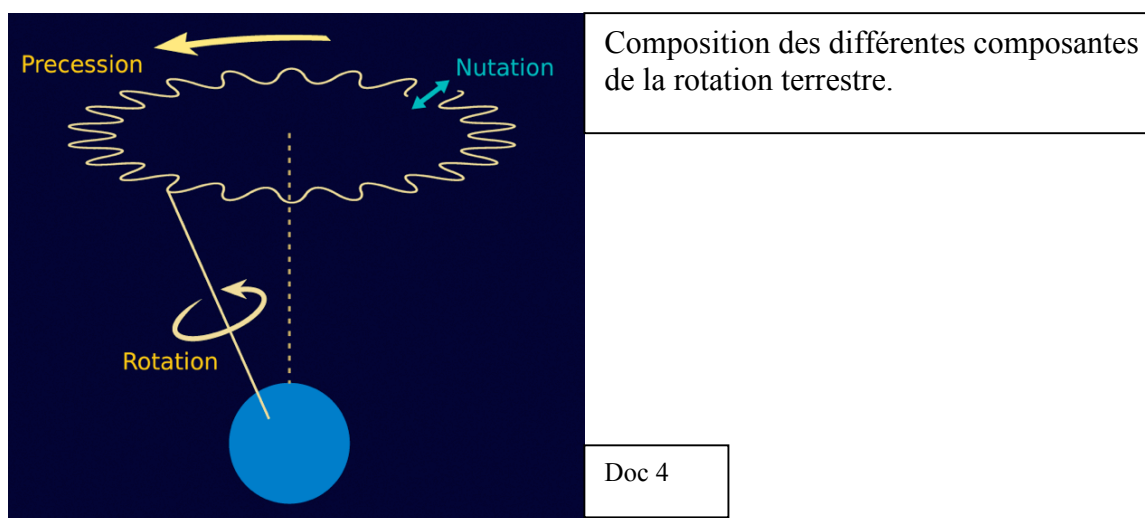
1° remarque : la constitution d'un glacier n'est pas un phénomène instantané ; elle procède du rapport entre la neige tombée et la neige fondue ; c'est donc un résidu de neige ou de glace à la saison chaude qui va constituer le noyau de formation du glacier ; si ce rapport demeure durablement positif, la glace va s'étendre, ne serait-ce que de quelques m<sup>3</sup> chaque année, et le glacier se formera, fût-ce en plusieurs millénaires.

Schématiquement : si les hivers sont froids, il tombe beaucoup de neige mais comme, sauf facteur antagoniste, les étés sont chauds, elle fond toute ; l'inverse n'est pas vrai.

2° remarque : c'est la Lune qui maintient l'inclinaison de l'axe de rotation terrestre autour d'une valeur faible. Mais son orbite est de plus en plus excentrique et cet effet régulateur va s'amoinrir sur une très longue période<sup>7</sup> puis disparaître.

### γ Le cycle de la précession axiale

C'est l'oscillation conique de l'axe de rotation des pôles terrestres par rapport au centre de la Terre. (Doc 4)



Elle est provoquée par l'attraction spécifique exercée sur le bourrelet équatorial terrestre par le soleil et les géantes du système solaire, selon un mouvement analogue à celui du toton ou de la toupie.

La précession axiale est lisible dans le fait que l'étoile polaire change au cours du temps :

- Véga de la Lyre, il y a 13 000 ans
- Alpha de la Petite Ourse aujourd'hui
- Delta du Cygne, à quelques degrés près, dans 10 000 ans.

Ce cycle est de 26 000 ans.

Il a pour principal effet de modifier la position de la Terre sur son orbite elliptique au moment des solstices et des équinoxes<sup>8</sup>, ce qui, là encore, a un impact sur les contrastes saisonniers et donc, comme nous l'avons vu, sur les glaciations.

Mais alors que les deux autres cycles ont une faible influence sur l'insolation, la précession axiale a un impact beaucoup plus important. Qu'on en juge :

<sup>7</sup> ≈ 1 milliard d'années

<sup>8</sup> C'est pourquoi on le nomme encore « cycle de la précession des équinoxes »

- La puissance solaire moyenne actuelle reçue au sol sur une année est de  $342\text{w/m}^2$ <sup>9</sup>.
- La variation induite par l'excentricité est de  $\pm 2\text{w/m}^2/\text{an}$
- La variation induite par l'inclinaison est de  $\pm 15\text{w/m}^2/\text{an}$
- La variation induite par la précession axiale est de  $\pm 50\text{w/m}^2/\text{an}$

Cette variation suffit, dans une ère glaciaire, à déclencher le passage d'une période glaciaire (avancée des glaciers) à une période interglaciaire (recul).

Actuellement la Terre est au périhélie au moment du solstice d'été austral, ce qui constitue un facteur de réchauffement, du fait de la plus grande efficacité des surfaces océaniques dans la captation de l'énergie solaire.

Il faut encore ajouter que la trajectoire globalement circulaire de l'axe des pôles dans la précession axiale n'est pas linéaire mais oscille elle-même autour du cercle idéal selon un cycle de 18 ans et 7 mois ; c'est la nutation. Elle se traduit par des variations d'ensoleillement pour un point donné, du fait de sa distance relative au plan orbital.

### δ Quelques considérations supplémentaires

Une ère glaciaire est définie comme la période géologique pendant laquelle il existe des inlandsis, c'est-à-dire des glaciers continentaux, d'une surface égale ou supérieure à  $50\,000\text{ km}^2$ .

Nous vivons dans la 5<sup>e</sup> ère glaciaire, entamée il y a environ 35 millions d'années et dans un âge ou une période interglaciaire, l'Holocène<sup>10</sup>, qui a commencé il y a 13 000 ans et qui devrait, en principe, s'achever dans 20 000 ans.

L'ensemble des 3 cycles orbitaux induit, dans l'ère quaternaire, une alternance entre des périodes glaciaires de 100 000 ans en moyenne, séparées par des périodes interglaciaires de quelques dizaines de milliers d'années.

Remarque : si les cycles orbitaux paraissent bien déterminer le passage d'une période glaciaire à une période interglaciaire, ils ne peuvent à eux seuls rendre compte :

- ni de la différence de température moyenne globale -  $\pm 6^\circ\text{C}$  - séparant une période glaciaire d'une période interglaciaire
- ni, surtout, de la survenue d'une ère glaciaire, d'une durée de plusieurs millions d'années, et qui relève de facteurs plus étroitement terrestres que nous allons examiner maintenant.

<sup>9</sup> Le watt est une unité de puissance équivalant à 1 joule / seconde.

<sup>10</sup> Que certains ont proposé de rebaptiser « anthropocène ».

## 2 – Éléments terrestres

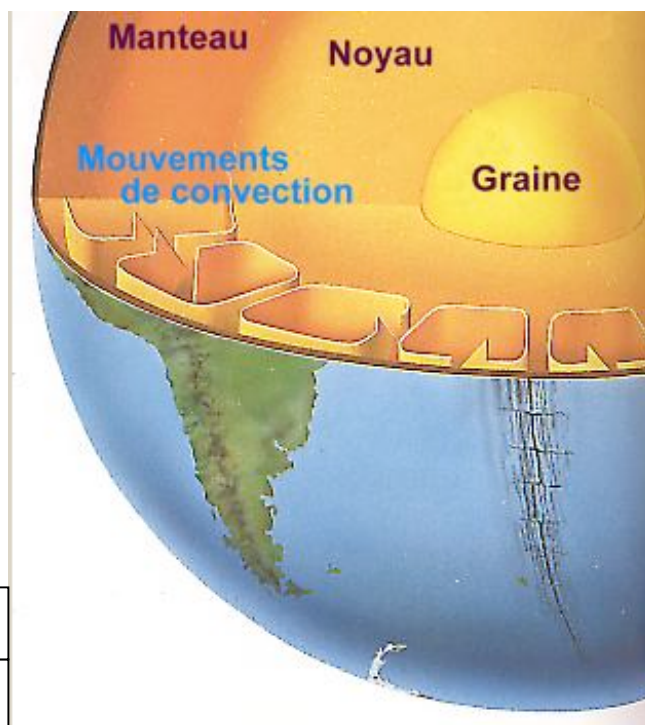
Les variations d'insolation locales ou générales qui résultent de la superposition des cycles astronomiques vont engendrer un certain nombre de conséquences climatiques qui seront majoritairement :

- retardées
- non proportionnelles.

Ceci s'explique en particulier par la composition chimique de l'atmosphère, la répartition des masses continentales, l'efficacité de captation des différentes surfaces, le système général des enveloppes fluides, atmosphère et océans.

Ces différents facteurs interagissent les uns avec les autres. Examinons-les.

### a) Mouvements tectoniques (Doc 5)



Doc 5

Structure interne du globe terrestre.

Schématiquement notre planète comporte, du centre à la périphérie :

- un noyau fer/nickel, engendrant, dans sa partie supérieure liquide, animée de courants de convection<sup>11</sup>, un champ électrique qui engendre lui-même un champ

<sup>11</sup> La convection est définie, dans un milieu donné, comme le déplacement de matière induit par la différence de température. Par exemple, dans le manteau terrestre, les masses magmatiques les plus chaudes se dilatent,

magnétique qui, d'une part, retient son atmosphère, d'autre part, la protège du vent solaire.

- un manteau visqueux dont la partie supérieure magmatique, l'asthénosphère, engendre, elle aussi, des courants de convection ; la différence de température entre la partie inférieure du manteau (3000°C) et sa partie supérieure (1300°C) va faire remonter des poches plus chaudes de moindre densité qui vont pousser vers le bas des poches superficielles plus froides et donc plus denses, créant ainsi un système analogue à un tapis roulant. C'est l'origine des phénomènes sismiques.
- une lithosphère composées de plaques rigides. A l'exception de la plaque pacifique, les plaques principales sont mixtes, portant à la fois les croûtes continentales et des bassins océaniques.

Au niveau des dorsales médio océaniques – structures de contact entre le magma du manteau et l'océan – de la roche est continuellement créée, écartant l'une de l'autre les plaques océaniques et provoquant une remontée de la lithosphère.

Ex : la dorsale medio atlantique, repérable par la surrection des îles, des Bermudes au Groenland.

Une croûte continentale peut se scinder sous l'effet d'une remontée du manteau ; c'est un rift qui, par l'amincissement de la lithosphère sous-jacente, prélude généralement à la constitution d'un proto océan et à la division de la plaque initiale.

Ex : le grand rift est africain.

Comme les courants de convection de l'asthénosphère vont provoquer le déplacement des plaques de quelques centimètres par an, mais que la surface terrestre n'est pas infinie, les plaques finissent par converger provoquant principalement

- l'orogénèse, c'est-à-dire la création du relief montagneux,
- la subduction, c'est-à-dire la plongée d'une fraction de plaque océanique sous une fraction continentale de moindre densité, avec fonte des roches dans le magma

le tout accompagné, de tsunamis, de séismes et d'éruptions volcaniques.

L'impact majeur de la répartition continentale tient à son incidence sur le système des courants océaniques et des vents ; d'autre part les volcans sont intégrés au cycle biogéochimique du carbone. Nous aborderons plus loin ces composantes.

Cependant cette répartition des continents a également un impact en elle-même : comme ils sont moins efficaces que les océans dans la captation de l'énergie solaire, la présence de masses continentales importantes dans la zone intertropicale est un facteur de refroidissement. Avec la remontée actuelle de la grande masse continentale Eurasie /Afrique vers le Nord, la tendance est donc au réchauffement.

L'orogénèse joue aussi un rôle notable. Comme l'effet de serre provient pour l'essentiel des infrarouges réémis par les surfaces terrestres, dans la troposphère<sup>12</sup>, il fait plus froid en altitude. Le relief montagneux se traduit par une diminution moyenne de température de 6,5°C par tranche de 1000 m ; c'est ce qui va permettre la constitution des glaciers continentaux et retiendra, le cas échéant, sur l'ensemble climatique terrestre.

Ex : Le soulèvement du plateau tibétain et la formation de la Sierra Nevada ont probablement joué un rôle majeur dans le déclenchement du dernier âge glaciaire (de 110 000 à 10 000 ans AEC),

- d'une part en déviant les vents d'ouest, refroidissant ainsi toutes les masses continentales de l'hémisphère nord,
- d'autre part en augmentant, par la formation des glaciers, le quota de chaleur non captée

NB : la température régnant aux pôles n'est pas seulement le fait du moindre ensoleillement :

- en Arctique, c'est la fermeture continentale qui en isolant presque complètement l'océan, a favorisé son refroidissement et la formation de la calotte glaciaire.
- en Antarctique, à l'inverse, c'est l'ouverture du passage de Drake, entre la Patagonie et l'Antarctique, qui a permis sous l'action de vents particulièrement violents, la formation du courant circumpolaire, le plus puissant du globe, et a isolé thermiquement le continent, permettant ainsi son englacement, ce qui a initié l'ère glaciaire actuelle, il y a 35 millions d'années.

#### b) L'albédo et la nébulosité<sup>13</sup>

L'albédo est défini comme le rapport, noté de 0 à 1, entre l'énergie solaire réfléchie et l'énergie solaire incidente.

Deux chiffres clefs :

neige fraîche : de 0,75 à 0,90

océans : de 0,005 à 0,15

L'albédo moyen de la Terre est de 0,3, ce qui signifie que 30% de l'énergie solaire est réfléchie par les surfaces terrestres et la nébulosité.

<sup>12</sup> La partie de l'atmosphère la plus proche de la surface terrestre.

<sup>13</sup> Proportion du ciel recouverte de nuages.

Par conséquent 70% de l'énergie solaire est absorbée par l'atmosphère, les continents, les océans et est transformée en énergie et en chaleur.

Le soleil émet dans toutes les longueurs d'onde mais pour l'essentiel, dans le visible et le proche infrarouge. La partie de l'énergie solaire captée réémise par les surfaces terrestres du fait de l'albédo l'est essentiellement dans l'infrarouge ; c'est elle qui est réabsorbée en grande partie par l'atmosphère et constitue l'effet de serre.

Or il se trouve que la majorité des rétroactions liées aux variations de l'albédo sont positives, c'est-à-dire que non seulement elles induisent une augmentation du réchauffement mais encore elles enclenchent une spirale autoentretenu qui provoque une accélération de ce réchauffement :

Cas type : fonte de la banquise > diminution maximale de l'albédo > captation augmentée de la chaleur radiative par la mer > réchauffement de la banquise > fonte de la banquise > et c...

Les nuages ont d'une part un effet refroidissant en ce qu'ils ont globalement un albédo élevé et réémettent donc une part significative de l'énergie solaire absorbée vers la haute atmosphère, lui interdisant d'être captée par les surfaces terrestres.

Mais, d'autre part, ils ont un effet réchauffant : ils interceptent, du fait de la vapeur d'eau dont ils sont essentiellement composés, la majeure partie du rayonnement infrarouge réémis par les surfaces terrestres et le renvoient vers elles.

On peut apprécier l'importance de cet effet de serre par deux constats :

- l'écart de température qui sépare la nuit et le jour dans les zones désertiques (pas d'évapotranspiration, donc pas de nébulosité, donc pas de séquestration de la chaleur) et qui peut atteindre 35°C.
- l'expérience banale qu'à température diurne égale, une nuit nuageuse est sensiblement moins froide qu'une nuit claire.

Ceci posé, il faut tenir compte, pour établir le bilan de la nébulosité de plusieurs autres facteurs :

- de l'albédo spécifique de la surface terrestre au-dessus de laquelle ces nuages s'étendent. De jour, l'effet refroidissant sera d'autant plus grand que l'albédo de cette surface est plus faible.
  - de leur température propre. Comme ils absorbent le rayonnement infrarouge provenant de la surface qu'ils recouvrent, plus leur température sera basse, plus ils conserveront de chaleur et moins ils en émettront vers l'espace.
- Ce sont donc les nuages les plus froids et, donc généralement les plus élevés, qui ont l'effet de serre maximum.



- de leur extension et de leur durée de vie. Quel que soit leur effet dominant, plus ils sont étendus et plus ils sont efficaces. Par ailleurs, moins ils sont chargés en vapeur d'eau et plus ils mettront de temps pour précipiter.

Enfin le système nébulosité / albédo est lui-même en étroite corrélation avec trois autres composantes de la machinerie climatique dont nous abordons maintenant l'étude.

### c) Volcanisme et aérosols

En 1991, dans les Philippines, le volcan Pinatubo, en sommeil depuis 500 ans, entre en éruption. Bilan : un millier de morts.

De juin à septembre il éjecte dans l'atmosphère environ 10 km<sup>3</sup> de cendres. Il en résulte un refroidissement de la température terrestre de 0,5°C en moyenne, sur une durée d'une trentaine de mois.

Par quel mécanisme ?

Les aérosols – on désigne par ce terme les particules de toute origine en suspension dans l'atmosphère – ont sur le climat des effets complexes et antagonistes, dont l'importance relative varie en fonction de leur localisation, de leur forme, de leur taille et de leur composition chimique.

On en distingue trois :

1- Ils réfléchissent le rayonnement solaire et, par conséquent, le diffusent dans la zone où ils se trouvent.

A ce titre, ils réchauffent l'atmosphère, ce qui, paradoxalement, induit un refroidissement, à la fois :

- par la limitation de la formation des nuages (la vapeur d'eau se condense plus tard ou plus haut, même s'ils constituent par ailleurs des noyaux de condensation efficaces).
- par la limitation de la captation des infrarouges terrestres.

Cependant, comme pour les nuages, le bilan final de ce premier effet dépend de l'albédo de la surface survolée par les aérosols.

2- Si leur composition chimique le permet, ils absorbent le rayonnement solaire et peuvent donc, selon le régime des vents auxquels ils sont soumis, transporter cette chaleur d'un lieu à un autre.

Néanmoins leur temps de séjour dans l'atmosphère est court – 15 jours en moyenne – et ils s'éloignent généralement assez peu de leur lieu d'origine.

Ex : la poussière du Sahara transportée par le sirocco au Nord de la Méditerranée.

Par contre les aérosols volcaniques - qui peuvent être expulsés jusque dans la stratosphère - vont y subsister plus longtemps, se répandre plus largement et avoir des effets plus durables :

Ex : les cendres du Pinatubo se sont dispersées sur toute la zone intertropicale et ont séjourné 3 ans dans l'atmosphère.

- 3- Ils servent de noyaux de condensation à la vapeur d'eau des nuages et, par conséquent, à la formation des gouttes de pluie. Ils sont donc habituellement lessivés, ce qui explique leur faible longévité moyenne.

Les aérosols se trouvent généralement dans les basses couches de l'atmosphère et favorisent donc la formation de nuages à effet réfléchissant dominant.

Les aérosols d'origine anthropique (feux de végétation, combustions de roches fossiles, pollutions diverses), qui participent pour 10% au total des émissions, constituent, parce que leur taille est moindre que celle des aérosols naturels<sup>14</sup>, des noyaux de condensation plus efficaces. Ils augmentent donc la formation et la durée de vie des nuages ainsi que leur pouvoir réfléchissant ; ils majorent donc l'effet refroidissant.

Mais les volcans rejettent aussi dans l'atmosphère des quantités considérables de dioxyde de carbone et, pour certains, de méthane. Or, pour ces deux gaz à effet de serre, le temps de séjour moyen dans l'atmosphère n'est pas de 15 jours mais de 15 ans en moyenne pour le premier et de 10 ans pour le second.

L'effet combiné des aérosols et des gaz à effet de serre permet de comprendre pourquoi les « crises volcaniques » sont probablement à l'origine de la plupart des extinctions massives que la Terre a connues depuis la première apparition de la vie. Mais ce n'est pas leur seul effet.

Deux cas d'école :

- 1- L'extinction Permien / Trias (250 millions d'années AEC)

On la surnomme « la grande agonie » (« The great dying »). Et non sans raison :

- 95% des espèces marines disparaissent
- 70% des espèces continentales

<sup>14</sup> Pour un volume donné, la surface totale de 2 petites sphères entre lesquelles ce volume serait réparti, est supérieure à celle de la sphère qui aurait exactement ce volume.

La vie finira par repartir mais il lui faudra 30 millions d'années pour recoloniser, sous de nouvelles formes, l'ensemble de la planète.



Doc 6

Paysage des trapps. Photo Biot

Cette crise prend naissance en Sibérie (**Doc 6**). Onze phases éruptives massives vont s'échelonner sur 200 000 ans ; on estime que pendant cette période, 3 millions de km<sup>3</sup> de matériaux divers ont été largués dans l'atmosphère.

Les coulées de laves ont recouvert jusqu'à 7 millions de Km<sup>2</sup>.

L'obscurcissement permanent du ciel a interrompu durablement la photosynthèse et la chimiosynthèse grâce auxquelles les organismes dits autotrophes – qui transforment la matière inorganique – subsistent.

Comme ces organismes sont à la base de toutes les chaînes alimentaires, on conçoit que leur disparition ait entraîné une extinction massive.

Cet effet initial pourrait avoir été relayé par deux autres impacts :

- le largage de quantités particulièrement importantes de gaz à effet de serre dans l'atmosphère du fait que les poussées magmatiques ont traversé des sédiments riches en charbon. Il en a probablement résulté un réchauffement brutal et durable.
- la destruction de l'ozone stratosphérique par la synthèse du sulfure d'hydrogène dans l'atmosphère. Des rayons ultraviolets B et C parviennent alors largement sur les surfaces terrestres et atteignent les pics d'absorption des acides aminés, causant aux cellules vivantes des dommages irréparables.

## 2- La fin de la Terre / boule de neige.

Les cyanobactéries sont apparues sur Terre il y a 3,4 milliards d'années et sont, avec les archées, les êtres vivants les plus anciens que nous connaissons.

Ce sont initialement des monocellulaires aquatiques et procaryotes (n'ayant pas de noyau différencié). Elles sont naturellement autotrophes et se procurent leur énergie par le moyen de la photosynthèse ; à partir de l'énergie solaire, elles dissocient les molécules d'eau, récupèrent des électrons, fixent le dioxyde de carbone et le transforment en composés organiques, d'abord des sucres, puis, quand elles commencent à former des colonies, du calcaire. Les stromatolites sont les roches biogéniques produites par la sédimentation des tests calcaires de ces colonies bactériennes (**Doc 7**).

Au terme de ce processus biochimique, elles libèrent du dioxygène.

Les cyanobactéries ont été, avec quelques autres procaryotes, les seules occupantes de la planète pendant 1 milliard 200 millions d'années.

Et puis, il y a 2,4 milliards d'années, survient la « grande oxydation ».

Jusque là le dioxygène produit par les cyanobactéries était fixé par le fer dissout dans l'océan.

Mais quand tout le fer disponible fut utilisé, l'oxygène commença à s'accumuler dans l'atmosphère. Comme parallèlement celle-ci s'était fortement appauvrie en dioxyde de carbone, du fait de la constitution du carbonate par les colonies bactériennes durant ce temps considérable, il en résulta une modification considérable de la composition atmosphérique (**Doc 7**).

L'atmosphère primitive, essentiellement constituée de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone, ne comportant pas d'oxygène libre, les procaryotes primitifs étaient tous anaérobies.

- Le premier effet de la grande oxydation fut donc sûrement une grande extinction.
- Le deuxième fut de favoriser l'apparition sur Terre des aérobies, des eucaryotes et des organismes terrestres. Ce qui a rendu possible à terme cette floraison de formes vivantes, c'est la constitution de la couche d'ozone stratosphérique, capable d'empêcher le rayonnement ultraviolet de haute énergie de parvenir jusqu'aux surfaces terrestres. Or celle-ci, quoique tardive (500 millions d'années avant l'époque actuelle) n'aurait pas été possible sans la grande oxydation.
- Mais cette arrivée fut retardée de quelque 400 millions d'années par le troisième effet : une glaciation sans précédent. C'est le phénomène de la « Terre boule de neige ». Dans l'hypothèse la plus optimiste, seule la ceinture équatoriale serait demeurée libre de glace.

En réduisant drastiquement la proportion des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, la grande oxydation a enclenché la formation de glaciers qui ont poursuivi inexorablement leur avancée, en vertu de la boucle de rétroaction suivante :

diminution des gaz à effet de serre dans l'atmosphère > refroidissement > apparition de glaciers > augmentation de l'albédo > refroidissement > extension des glaciers > augmentation de l'albédo... et c.

Comment est-on sorti de cette spirale infernale ?

Probablement grâce aux volcans<sup>15</sup>, avec un double impact :

- augmentation de la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre
- diminution de l'albédo des glaciers par dispersion de suie.

Pourquoi s'arrêter si longuement sur le volcanisme ?

On concédera que son impact est crucial sur le climat et sur la succession des épisodes du vivant sur notre planète ; mais on objectera que nous n'y pouvons rien. Ce n'est pas certain.

L'Eyjafjöll, volcan islandais en sommeil depuis 187 ans, est entré en éruption le 20 mars 2010 et a perturbé les liaisons aériennes de l'Europe du Nord pendant plusieurs semaines.

Freysteinn Sigmundsson, volcanologue de l'université d'Islande, s'attend à une recrudescence de l'activité volcanique locale, du fait de la fonte des glaces<sup>16</sup>. Il s'appuie d'une part sur la coïncidence, il y a 10 000 ans, de la régression de la calotte glaciaire islandaise et d'une reprise importante de l'activité volcanique, d'autre part sur l'effet de la variation de pression sur le magma disponible.

La roche, comprimée par un poids suffisant, ne peut pas entrer en fusion, même si la température due à la proximité de la poche magmatique est suffisante pour le permettre. Par contre, si ce poids diminue sensiblement – ce qui est le cas dès que la glace commence à fondre – les roches vont se transformer en magma et la poche magmatique accrue, va commencer son ascension.

On a pu mesurer qu'une fonte de 10% du glacier Vatnajökull depuis 1890 qui a induit une remontée du magma sous-jacent de 2,5 cm / an.

Examinons maintenant la composante fluide du climat.

### c) Vents et courants

Le rayonnement solaire, majoritairement absorbée dans la zone intertropicale, est convertie en énergie et en chaleur et transportée vers les pôles par les vents et courants marins.

<sup>15</sup> les volcans ont probablement joué un rôle crucial dans la synthèse des acides aminés et, par conséquent, dans l'apparition du vivant sur Terre. Des travaux récents montrent qu'en propulsant du sulfure d'hydrogène dans l'atmosphère, les éruptions ont mis à la disposition des premières chaînes peptidiques de quoi former les liaisons covalentes, bases de la structure secondaire des protéines et de leur réactivité.

<sup>16</sup> Agence Reuters, 16 avril 2010.

## $\alpha$ - La circulation atmosphérique

Sous l'effet de l'énergie radiative, l'eau s'évapore de la surface des océans et l'air, chauffé par les infrarouges réémis par le sol, s'élève.

Ces masses d'air, dans lesquelles la vapeur d'eau va former les nuages par condensation, vont se déplacer en fonction de deux paramètres principaux :

### - La différence de pression

L'air chaud se dilate et s'élève, diminuant la pression dans la colonne d'air où il se trouve ; mais en s'élevant, il se refroidit.

L'air froid se condense et descend, augmentant la pression de la colonne d'air ; mais en se rapprochant du sol, il se réchauffe.

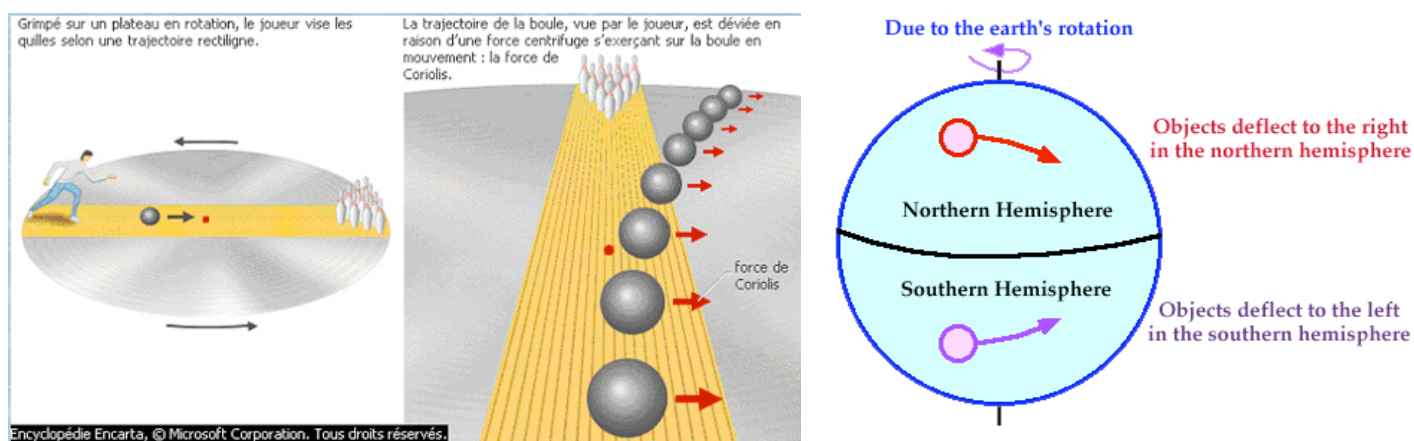
Ce déplacement vertical, induit par la différence de température et de densité, c'est la convection.

En même temps, à altitude égale, les masses d'air se déplaceront des zones de haute pression vers les zones de basse pression.

Si le gradient de pression était le seul facteur de déplacement de l'air, on aurait des courants de convection parallèles aux méridiens, orientés des pôles vers l'équateur. Ce n'est pas le cas

### - L'effet de Coriolis (Doc 8)

Celui-ci résulte du mouvement relatif des particules d'air par rapport au référentiel en rotation uniforme qu'est la Terre. Une pseudo force s'exerce donc perpendiculairement à la première et dévie ces particules dans le sens de la rotation terrestre, soit, par rapport à la position initiale, vers la droite dans l'hémisphère nord, vers la gauche dans l'hémisphère sud.



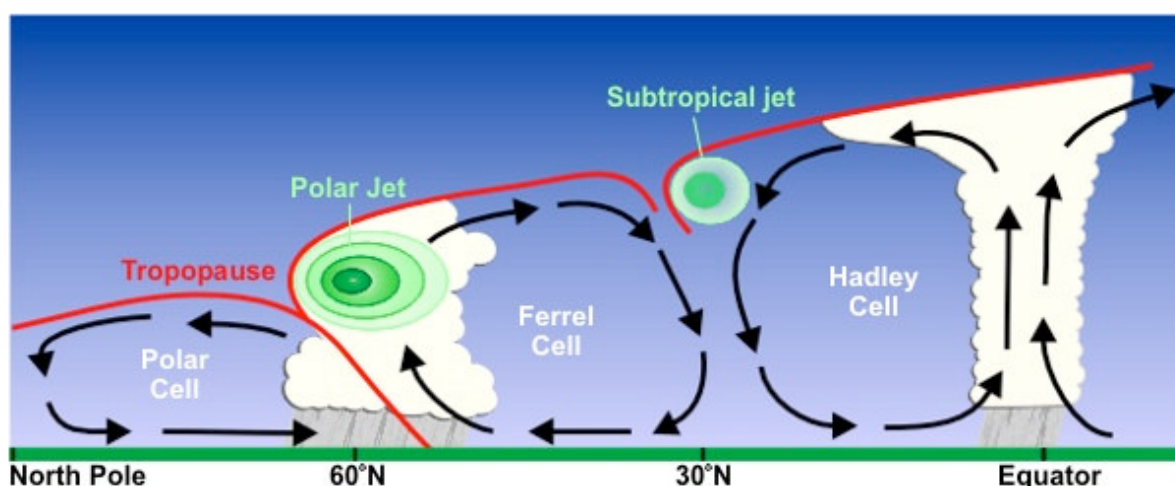
Le vent, c'est-à-dire le déplacement des masses d'air, résulte donc essentiellement d'une composition entre la force de pression et l'effet de Coriolis.

D'autres facteurs interviennent :

- la friction sur les reliefs continentaux.
- la force centrifuge.

C'est cette dernière qui explique les variations d'altitude des différentes couches qui composent l'atmosphère. La tropopause<sup>17</sup>, c'est-à-dire la limite séparant la troposphère de la stratosphère, est ainsi située à 7 à 8 kms au-dessus des pôles contre 13 à 16 kms au-dessus de l'équateur.

Par ailleurs, c'est l'un des éléments essentiels de la structure et de la distribution des cellules de convection et de l'orientation des vents dominants.



Cellules de convection, tropopause et jet streams.

On peut donc dire que :

1° Du fait de la variation d'ensoleillement moyen, on a des zones de haute pression aux pôles et des zones de basse pression dans la zone intertropicale.

2° La couche d'air la plus basse aux hautes latitudes va donc se déplacer en direction de l'équateur vers les zones de plus basse pression.

3° Mais l'air qui quitte les pôles va être dévié vers l'Ouest par l'effet de Coriolis, engendrant les vents d'Est<sup>18</sup> des zones polaires.

<sup>17</sup> C'est l'altitude où la température cesse de décroître par éloignement du sol et commence à croître par absorption du rayonnement solaire aux courtes longueurs d'ondes ; elle constitue la frontière de la troposphère, couche la plus basse de l'atmosphère, comportant 90% de la masse de l'air et 99% de son humidité.

<sup>18</sup> Un vent est qualifié relativement à sa zone d'origine. Vent d'est = vent venant de l'est.



4° Parallèlement l'air de la zone équatoriale, qui s'est élevé par l'effet de sa chaleur, finit par atteindre la tropopause et, étant comparativement plus froid, se dirige vers de plus hautes latitudes. Vers les parallèles 30° Nord et Sud le refroidissement de ces masses d'air est suffisant pour qu'elles amorcent, étant plus denses, leur descente vers la surface.

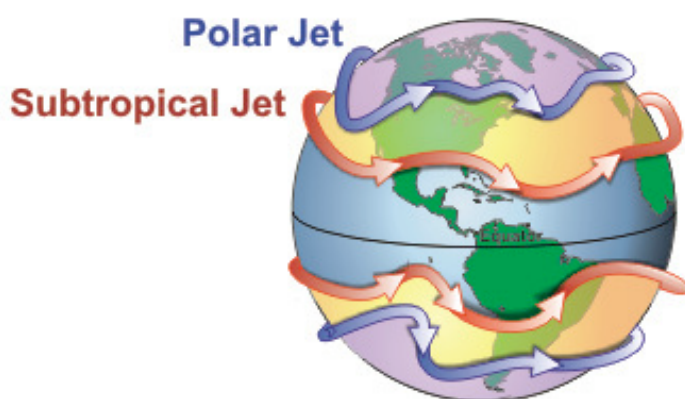
5° En arrivant au sol, l'air issu de la zone équatoriale revient en partie vers l'équateur, engendrant les deux premières cellules de convection, dites de Hadley, et se déplace en partie vers de plus hautes latitudes.

6° Ces masses d'air, déviées par l'effet de Coriolis, engendrent d'une part les alizés qui sont des vents d'est orientés vers les basses pressions équatoriales, d'autre part les vents d'ouest des latitudes tempérées, résultant des déplacements d'air engendrés par les vents d'Est polaires au Nord et par les alizés au Sud.

7° Vers les latitudes 60° Nord et Sud les masses d'air issues des parallèles 30° N et S, rencontrant les masses d'air plus froides en provenance des pôles, vont remonter en altitude où elles seront réorientées vers l'équateur, engendrant les cellules de Ferrel des zones tempérées.

8° L'air polaire, refoulé en altitude, formera les cellules polaires.

9° Les six cellules de convection, qui se répartissent en latitude autour de la planète, vont engendrer en altitude, du fait d'importantes variations de température sur de courtes distances, la dernière famille de vents dominants : les jet streams<sup>19</sup> (Doc 10). Ce sont des couloirs de vent à grande vitesse.



Doc10. Position des jet streams

<sup>19</sup> Ils résultent de fortes variations de température sur de courtes distances. Un fluide est dit barocline si les couches d'égale pression ne sont pas parallèles aux couches d'égale densité (barotrope dans le cas contraire). Dans un tel fluide, en zone de densité homogène, la différence de pression engendrera des mouvements (et inversement, en pression homogène, la différence de densité) Ces conditions se trouvent réunies en altitude, à la jonction des cellules de convection et, par conséquent, sur la totalité du pourtour terrestre.



Ils constituent l'un des principaux vecteurs du forçage<sup>20</sup> solaire.

Sur cette trame de vents dominants constants, mais néanmoins susceptibles de variations, vont s'installer des vents locaux, irréguliers, qui font intervenir :

- soit le relief

Ex : le foehn ou effet de foehn = un vent dominant entraîné vers un relief, se déleste de son humidité sur un versant et redescend sur l'autre, sec et progressivement réchauffé.

- soit la répartition locale entre surfaces continentales et surfaces océaniques.

Ex : le mistral.

La composition entre le gradient de pression atmosphérique et l'effet de Coriolis engendre dans certaines conditions, deux structures relativement durables :

- L'anticyclone

C'est une zone de haute pression qui subsiste du fait que les vents qui en sont issus, se déplacent circulairement autour d'elle, et en éloignent les masses d'air environnantes et leurs formations nuageuses.

- la dépression

C'est une zone de basse pression, appelant, par conséquent, les masses d'air environnantes ; mais celles-ci, déviées circulairement, vont la fermer, appelant du sol des masses d'air plus chaudes ascendantes qui se condensent et engendrent des précipitations.

C'est cette même structure, particulièrement énergétique en zone tropicale, qui engendre les cyclones.

Les différents compartiments qui composent le climat ont des temps de réponse très différents aux facteurs de forçage climatique.

Celui des fluides - et des vents en particulier - est extrêmement rapide.

C'est pourquoi on attendait des manifestations sensibles du réchauffement induit par l'effet de serre additionnel. Et tous les modèles climatiques le prévoyaient plus important aux pôles où la part relative de l'effet de serre dans la chaleur de la basse troposphère est évidemment la plus importante, comparée à la captation directe du rayonnement solaire.

Il y a bien, avec la fonte accélérée de la banquise arctique le signe incontestable d'un réchauffement ; mais elle est moins un effet que la cause probable d'une véritable catastrophe.

Pour le comprendre, il faut analyser les courants marins.

<sup>20</sup> Forçage climatique = tout élément qui modifie le bilan énergétique de la Terre.

## β - La circulation océanique

Les « enveloppes fluides » répartissent la chaleur reçue du soleil sur l'ensemble du globe. Si ce rôle est joué majoritairement par l'atmosphère, la contribution océanique n'est pas négligeable ; par exemple elle compte pour 1/3 à 20° de latitude N et S.

Par ailleurs, du fait de la plus grande inertie thermique de l'eau - qui peut emmagasiner 1200 fois plus de chaleur que l'air - les océans ont un effet global modérateur sur les extrêmes thermiques (climat océanique).

En outre ils ont deux rôles régulateurs essentiels :

- Ils sont à la base du cycle de l'eau.
- Ils constituent le principal puits de carbone planétaire.<sup>21</sup>

De quelle façon ces différentes fonctions sont-elles remplies ?

La circulation océanique est la résultante de la rotation terrestre, de l'attraction exercée par la lune et le soleil, des vents et des gradients de pression et enfin des reliefs sous-marins.

En incluant ces paramètres et à partir de l'ensoleillement initial, le couplage océan / atmosphère adopte deux formes principales :

### - La circulation profonde

L'évaporation importante des eaux superficielles en zone intertropicale provoque un accroissement de la densité de ces eaux par élévation de leur concentration en sel. Elles plongent, appelant en surface les eaux de plus hautes latitudes.

Un phénomène équivalent a lieu aux pôles, mais pour des raisons inverses. Au contact de l'air froid - à partir de -2°C - la glace de mer se forme, expulsant le sel contenu initialement dans l'eau. La densité des eaux superficielles augmente et celles-ci s'enfoncent, appelant en surface les eaux de plus basses latitudes.

La température des océans commence par décroître avec la profondeur. Quand les eaux qui ont plongé rencontrent des eaux plus froides ou plus salines - et par conséquent plus denses - elles amorcent leur remontée vers la surface.

Ceci constitue l'origine de la circulation thermohaline qui est donc initialement verticale et méridienne.

<sup>21</sup> La moitié du dioxyde de carbone disponible est conservée par l'atmosphère, la moitié est captée, pour une durée variable, par les « puits de carbone ». Sur un total de 3,6 Gt (giga tonne ; 1 Gt = 1 milliard de tonnes), la part de l'océan est de 2,3 Gt.

A noter : elle n'est pas la seule forme d'échange vertical.

La masse océanique est partiellement déportée vers les bords continentaux Ouest, du fait de la rotation terrestre.

Ce déportement, plus important pour les couches supérieures du fait de la force centrifuge, peut engendrer des variations considérables dans les hauteurs des colonnes d'eau, entre les bords continentaux Est et Ouest<sup>22</sup>. Il est donc compensé par des remontées d'eaux profondes et froides sur les bords continentaux Est ; c'est le phénomène d'upwelling.

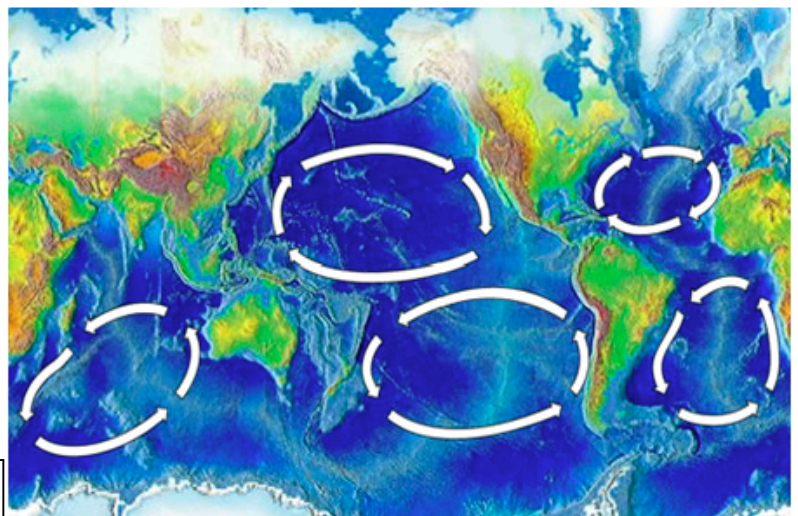
- La circulation superficielle.

Elle concerne les eaux de surface qui se déplacent sous l'effet du forçage éolien, soit environ 10% de la masse océanique.

Les vents transmettent à l'eau, sur une profondeur moyenne de 300 m, leur énergie par frottement, ce qui va produire :

- ⇒ les courants de surface qui constituent les principaux agents de transport de chaleur.
- ⇒ la houle<sup>23</sup>, oscillation sans transfert de matière, qui constitue le vecteur des échanges gazeux entre l'océan et l'atmosphère, en particulier celui du piégeage mécanique du carbone.

NB1 : d'une façon analogue à ce qui a lieu dans l'atmosphère, à partir des différents courants, l'effet de Coriolis engendre des courants circulaires superficiels, les gyres océaniques (Doc 11). Ils sont entretenus par les vents dominants, du fait de leurs directions opposées : alizés dirigés vers l'ouest, vents des zones tempérées dirigés vers l'est.



Doc 11 Principaux gyres océaniques

<sup>22</sup> On a mesuré une différence de 150 m en septembre 1992 entre les colonnes les plus hautes, dans l'est pacifique et les colonnes les plus basses dans l'Atlantique est.

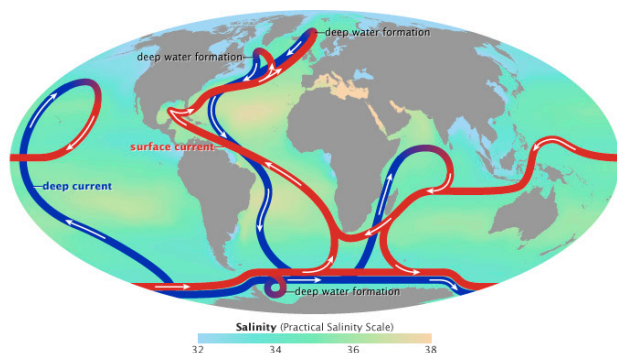
<sup>23</sup> Le déferlement joue lui aussi un rôle dans ces échanges.

Circulation profonde et circulation superficielle sont en interrelation et en prise avec la dynamique atmosphérique. Le Gulf Stream, par exemple, est issu de la composition de la remontée thermohaline superficielle, dite Dérive nord Atlantique, et du gyre subtropical de l'Atlantique nord, alimenté en énergie par les alizés et structuré par l'anticyclone des Açores.

De ces multiples interrelations, il résulte en particulier une structure composite, à l'échelle du globe, que l'on désigne métaphoriquement comme « la grande courroie de transmission » ou « le grand tapis roulant » (Doc 12). Son débit est, en moyenne, de 19 sverdrups ; 1 sv vaut 1 million de m<sup>3</sup>/seconde. Elle équivaut, en ordre de grandeur, à la somme des débits de la totalité des fleuves continentaux<sup>24</sup>. Elle est le principal vecteur du transport de chaleur océanique mais elle joue aussi un rôle décisif dans le piégeage du carbone, l'oxygénation de l'océan profond, la remontée des nutriments et, par conséquent, l'écologie marine.

Son énergie provient d'une part des gradients de densité et donc de salinité et/ou de température, entre les eaux polaires de surface et les autres. Mais elle est également entretenue, au niveau des gyres, par le forçage éolien.

Parvenues en mer de Norvège, les eaux salées<sup>25</sup> et chaudes du Gulf Stream se refroidissent rapidement au contact des eaux boréales froides et amorcent leur plongée ; celle-ci est favorisée, en hiver, aux plus hautes latitudes, par la formation de la glace de mer qui, par expulsion du sel, accroît la densité des eaux superficielles.



Doc 12 La grande courroie de transmission.

On estime que ce cycle dure en moyenne un millier d'années et que la vitesse du courant en profondeur est de l'ordre de quelques millimètres par seconde. Ce parcours s'est mis en place au Miocène, il y a 14 millions d'années, quand les continents ont atteint leur position actuelle ; ce sont alternativement les zones boréale et australe qui ont constitué le moteur principal de la circulation thermohaline et, par conséquent, de « la grande courroie de transmission ».

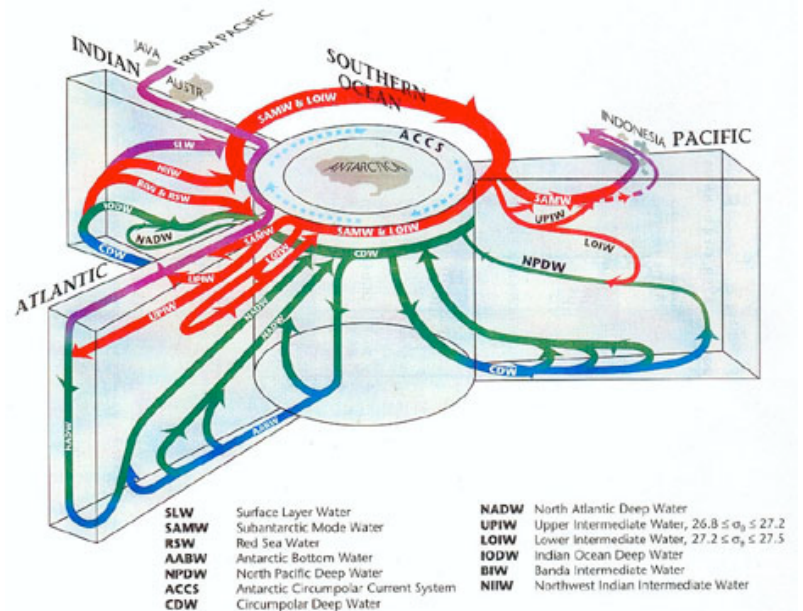
<sup>24</sup> Certaines portions des courants océaniques, du fait l'importance de leur débit, de leur composition chimique propre, de leur gradient de pression et de température avec les eaux environnantes, constituent pour les espèces marines qui y vivent, de véritables écosystèmes ; il est donc légitime de les considérer comme des fleuves.

<sup>25</sup> Cette salinité élevée, plus importante à la même latitude en Atlantique qu'ailleurs, est due à l'apport des eaux méditerranéennes.

Mais en Antarctique (Doc 13) le mécanisme de plongée est différent : il résulte de l'action du courant circumpolaire (140 Sv), aux eaux denses et froides. Cette densité est encore accrue par la formation de la glace de mer ; c'est elle qui va permettre

- d'une part la remontée des eaux profondes de l'Atlantique
- d'autre part le brassage de ces eaux avec celles des autres bassins océaniques.

Doc 13  
Composition des courants superficiels et profonds dans l'Antarctique.



Or la « grande courroie de transmission » donne depuis quelque temps des signes de faiblesse. Trois indications :

1 - La convection profonde a été ralentie - et parfois même interrompue - de 1990 à 2007, année où elle a retrouvé brutalement, au cours d'un hiver froid, son régime habituel. On ne dispose pas, pour le moment, d'explication satisfaisante. C'est d'autant plus inquiétant, qu'en deçà d'une certaine profondeur, il n'y a plus de piégeage du carbone.

2 - Dans l'Atlantique, la montée des eaux chaudes et salines vers le nord était habituellement compensée

- d'une part par la descente thermohaline des eaux profondes
- d'autre part par un courant superficiel inverse, froid, orienté nord / sud, le courant du Labrador.

Or depuis 1990 la part respective de ces deux courants dans le rééquilibrage des eaux s'est inversé : le courant du Labrador est devenu majoritaire dans ce transfert et la circulation profonde a perdu 30% de son débit.

On constate d'autre part que la composition de ces eaux profondes s'est modifiée :

- plus faible salinité
- moindre apport des mers nordiques.

3 - La circulation atlantique méridionale a ralenti de 30% entre 1998 et 2004 et on estime que le Gulf stream a perdu 30% de son débit depuis 1957.

Il est donc probable que la diminution permanente de la banquise et des glaciers polaires depuis une vingtaine d'années, accompagnée d'une modification de l'albédo et d'une rétroaction positive, a provoqué la mise en place d'une couche d'eau superficielle pauvre en sel, qui ralentit la plongée convective, ce qui bloque en surface les eaux issues des basses latitudes.

Cet effet est amplifié par l'augmentation sensible du débit des fleuves se déversant dans l'océan arctique, elle-même provoquée par l'augmentation des pluies et la fonte des pergélisols terrestres et océaniques. On a récemment découvert, au sein du gyre de Beaufort, situé au large des côtes du nord-est du Canada un réservoir d'eau douce ou faiblement salée d'environ 8000 km<sup>3</sup>, sur une profondeur de 27 m<sup>26</sup>. Il y a là un déversement potentiel de 20% d'eau douce supplémentaire dans l'Atlantique nord, ce qui suffirait à ralentir dangereusement la « grande courroie de transmission ». Celle-ci est en effet particulièrement vulnérable, puisque ses eaux profondes ne se forment qu'en deux zones limitées : les mers boréales<sup>27</sup> en Arctique, la mer de Weddell en Antarctique.

Or étant donné que toutes les formes de la circulation océanique sont en interrelation permanente, le simple ralentissement de « la grande courroie de transmission » retentirait sur l'ensemble des climats terrestres, si ce n'est déjà le cas.

A titre d'illustration, la modification du courant du Labrador paraît avoir induit une remontée du Gulf Stream vers le nord, probablement amplifiée par l'accroissement d'activité du gyre subpolaire sous l'effet des changements de densité. Or la modification des courants de surface déplace les zones où la chaleur est cédée à l'atmosphère et retentit donc sur le régime des vents. Une étude sur 30 ans<sup>28</sup> fait apparaître une modification des vents dans le grand ouest français, à la fois dans la direction (décalage vers le Nord Est) et dans l'intensité et la fréquence des vents forts (force  $\geq 7$ ).

On peut apprécier l'effet Gulf Stream en rappelant que la ville de La Rochelle est approximativement située à la latitude de celle de Québec. Mais, selon toute vraisemblance, les changements ne seront pas progressifs. L'accumulation quantitative fait parvenir tout système naturel (donc complexe) à certains seuils critiques ; une fois atteint le point de basculement, on entre, après une période plus ou moins longue de changements erratiques, dans une nouvelle configuration, proche de la précédente ou pas.

<sup>26</sup> C'est 2 fois le volume du lac Victoria, l'un des plus grands du monde.

<sup>27</sup> Mer de Norvège, mer du Groenland, mer du Labrador.

<sup>28</sup> Lemasson Régnauld – 1997

Par exemple la fusion basale de la banquise, du fait d'une augmentation de la chaleur de l'eau peut déstabiliser un plateau glaciaire, l'entraîner en mer et ajouter abruptement une telle quantité d'eau douce à l'océan arctique que la plongée thermohaline sera interrompue.

Ces points de basculement sont une caractéristique des systèmes complexes ; en témoignent les événements climatiques procédant d'oscillations périodiques qui forment la dernière composante du compartiment océanique du climat.

Les premiers, qui sont des variations climatiques brutales, sont attestés par la paléoclimatologie et concernent justement l'Atlantique nord. Ce sont, pour les périodes glaciaires, les événements de Heinrich et les cycles de Dansgaard-Oeschger; pour les interglaciaires, les événements de Bond.

A périodicité et à durée variable, ces événements consistent tous, à l'échelle géologique, en un bref épisode de refroidissement prenant place dans une tendance générale au réchauffement.

Le schéma est globalement le même :

- 1- déversement de lac glaciaire, fonte de la banquise ou vêlage d'icebergs provoqué par le réchauffement
- 2- mise en place d'une couche d'eau faiblement salée dans les mers boréales
- 3- ralentissement ou interruption de la plongée thermohaline et donc de la grande courroie de transmission.
- 4- refroidissement de la zone subpolaire et extension des glaciers.

Cependant le réchauffement global finit par rétablir, en renforçant la circulation subtropicale (Gulf Stream et Dérive nord Atlantique), la circulation thermohaline.

L'impact écologique est considérable : désertification des zones intertropicales par affaiblissement des moussons et disparition de la végétation des zones tempérées au profit d'un couvert végétal de type steppe.

Si la circulation thermohaline devait se modifier avec l'ampleur et la rapidité que prévoient les modèles, ni les écosystèmes, ni les systèmes socio-économiques n'auraient le temps de s'y adapter.

Nous ne savons pas encore interpréter avec certitude ces oscillations longues. Par contre d'autres, plus rapides, sont désormais expliquées.

La plus connue est « El Nino ».

Analysons la.



Le gyre du Pacifique sud engendre un courant méridien froid, orienté Sud Nord et remontant le long des côtes Est de l'Amérique latine ; c'est le courant de Humboldt.

Le gradient de température qui en résulte (entre les rives Est et Ouest du Pacifique) permet la constitution d'une cellule atmosphérique spécifique : la cellule de Walker.

Schématiquement :

- les alizés, le gradient thermique et la rotation terrestre engendrent un vaste bassin d'eau chaude ( $\approx 30^\circ \text{C}$ ) au large des côtes méridionales Est de l'Asie.
- l'évaporation importante à l'aplomb du bassin - nous sommes en zone équatoriale, entre  $10^\circ \text{N}$  et  $10^\circ \text{S}$  - produit d'importants nuages qui s'élèvent en altitude.
- Une fois refroidis, ces nuages refluent vers l'Est, en zone de moindre pression atmosphérique.

Comme, contrairement à l'air, l'eau est fort peu compressible, il existe en permanence une différence moyenne de 60 cm de hauteur entre les eaux chaudes et hautes de l'Ouest et les eaux basses et froides de l'Est.

Enfin les eaux chaudes constamment refoulées vers l'Ouest par la rotation terrestre et les alizés sont remplacées au fur et à mesure par des eaux profondes froides remontant le long des côtes du Pérou, de l'équateur et de la Colombie ; c'est l'upwelling, ici majoré par le couplage thermodynamique océan/atmosphère.

Et puis, tous les 2 à 7 ans, à l'époque de Noël (d'où l'appellation El Nino : l'enfant), apparemment par l'effet de l'affaiblissement thermique des alizés, l'upwelling disparaît (et avec lui le poisson des pêcheries péruviennes) parce que le bassin d'eau chaude dévale vers l'Est, entraînant avec lui la convection atmosphérique, les nuages et la pluie.

A la suite de quoi la sécheresse s'installe sur les rives intertropicales du Pacifique Ouest pour une durée de 6 à 18 mois.

Enfin un phénomène El Nino retentit sur l'ensemble des climats terrestres :

- tempêtes de neige au Canada
- déluges en Californie
- cyclones dans le Pacifique
- sécheresse en Australie et en Amérique centrale.
- forte pluviosité en Afrique de l'est
- diminution de la banquise en mer de Ross mais augmentation en mer de Weddell
- affaiblissement de la mousson indienne

Dans l'Atlantique, par contre, les ouragans disparaissent, El Nino renforçant les vents d'Ouest d'altitude qui cisailent alors les colonnes dépressionnaires.



Le retour à l'équilibre a lieu par l'effet d'un processus inverse, « la Nina », qui se signale en particulier par :

- une augmentation de la convection dans le Pacifique Ouest
- un rétablissement de la cellule de Walker
- un renforcement des alizés

Les effets de « la Nina » sont cependant spécifiques par rapport aux années qu'on n'ose plus qualifier de normales :

- vagues de froid en Amérique du nord et tempêtes en Atlantique
- sécheresse et froid en Amérique du sud mais retour de l'upwelling (et de la pêche).
- pluies abondantes en Asie et en Australie
- hivers doux et secs en Europe du Sud mais froids et humides en Europe du Nord

Le système climatique pacifique tropical oscille donc entre deux états extrêmes, d'où son acronyme : ENSO = El Nino Southern Oscillation.

Malgré son caractère épisodique, ce qui frappe dans l'événement « El Nino », c'est son irrégularité. Ceci a conduit à distinguer les épisodes proprement dits, d'une durée de 9 à 24 mois, des « conditions », d'une durée de 5 à 8 mois.

Le temps séparant deux épisodes serait celui qui est nécessaire à la reconstitution du bassin chaud du Pacifique ouest.

Quant à l'impact planétaire, il s'explique par le fait que l'océan Pacifique, parce qu'il constitue à la fois le plus grand réservoir de chaleur et la plus importante interface océan/atmosphère, engendre le schéma général des vents.

On observe depuis quelque temps une augmentation de la fréquence et de l'intensité du phénomène El Nino qui pourrait être liée au réchauffement climatique, d'autant qu'il s'accompagne d'une diminution du nombre des événements La Nina, mais pas de leur intensité. En 2010-2011 l'épisode s'est soldé par des pluies diluviennes et des inondations dévastatrices dans l'Est australien.

Cette évolution récente pourrait être liée à un réchauffement anormal de la couche d'eau superficielle de l'océan.

L'épisode de 1998 a débuté avec une augmentation de 1,5° C de la température de l'air au-dessus du Pacifique Ouest au lieu du 0,25°C habituel et son impact planétaire a été particulièrement important :

- sécheresses et incendies en Australie, en Indonésie et en Papouasie Nouvelle-Guinée (2 millions d'hectares de forêt ont été détruits dans ces deux derniers états).
- tempêtes meurtrières en Floride, avec des rafales atteignant 400 km/h

- inondations catastrophiques au Pérou ; 35 ponts s'effondrent et l'eau déterre les morts d'un cimetière.

L'épisode de 2002 se signale à l'attention par :

- des inondations en Afrique orientale
  - des pluies diluviennes au Chili : 65 000 déplacés.
  - la pire sécheresse du siècle en Australie : des troupeaux entiers meurent de faim
  - des tempêtes meurtrières sur la côte Ouest des Etats-Unis, avec neige et verglas.
- 
- De tels épisodes ont évidemment un impact important sur les récoltes et la sécurité alimentaire des populations affectées mais aussi sur le plan sanitaire :
    - \* cas de choléra et de paludisme au Pérou pendant l'épisode El Nino 1998
    - \* malaria en Inde, au Venezuela et en Colombie
    - \* fièvre de la vallée du Rift au Kenya et en Somalie

L'ENSO n'est cependant pas une exception. L'océan, parce qu'il présente une inertie plus importante et un temps de réponse plus long que ceux de l'atmosphère, engendre une multitude de telles oscillations. Par exemple :

- 1° Le mode équatorial
- 2° Le mode dipolaire
- 3° L'oscillation décennale du Pacifique
- 4° L'oscillation atlantique multi décennale
- 5° L'oscillation Nord Atlantique

6° L'oscillation Arctique (OA ; AO ang.)

Son influence s'étend à tout l'hémisphère Nord. Sa périodicité est d'une soixantaine d'années. Sa phase positive se définit par une anomalie simultanée des pressions atmosphériques respectives du pôle Nord et du 45° parallèle, la première étant plus basse et la seconde, plus haute que la normale. Il s'ensuit un renforcement des vents d'Ouest.

Ce renforcement provoque la formation d'un vortex polaire lequel, en dépit des pressions plus basses, induit un refroidissement général de l'Arctique ; comme l'air froid est bloqué au-dessus du pôle, les régions circumpolaires connaissent des températures plus clémentes, ce qui provoque en particulier la fonte du pergélisol.

Cependant, en dépit de cette isolation thermique causée par le vortex, la phase positive de l'OA, du fait de l'abaissement de la pression atmosphérique et de la force des vents, va avoir un effet destructeur sur la banquise.

La fonte du pergélisol et de la banquise que l'on observe actuellement pourrait donc bien avoir été enclenché par un épisode positif durable de l'OA survenu dans les années 90.

A noter : le pergélisol, sol gelé en permanence, représente 24% des surfaces continentales de l'hémisphère nord et probablement une surface importantes des plateformes sous-marines ; or il contient des quantités colossales de méthane.

La superposition des cycles physicochimiques du climat aboutit donc à un système relativement cadré mais n'excluant pas les manifestations erratiques ; il est dès lors aisé de saisir pour quelle raison il est si difficile d'y évaluer l'impact du vivant en général et des activités humaines en particulier.

#### d) Le facteur biotique

Nous avons vu comment les cyanobactéries avaient autrefois causé le refroidissement de la Terre et rendu possible l'apparition des organismes aérobies.

Les êtres vivants ne sont pas séparables du milieu dans lequel ils se développent, non seulement parce qu'ils y puisent de quoi se perpétuer mais aussi parce qu'ils façonnent ce milieu fini, au point de le rendre parfois impropre à leur survie.

La vie n'est donc pas cette apparition miraculeuse qui surgirait sur fond d'une lithosphère impavide. Le charbon et le pétrole mais aussi l'argile, le sable en partie, le calcaire - dont les stromatolites édifiées pendant des éons par les bactéries fondatrices (Doc 7) - sont des reliquats du vivant. On évalue actuellement à 15% des sédiments la part des roches biogéniques dans notre environnement ; mais quelle serait la proportion absolue du biogénique si l'on pouvait tenir compte du recyclage magmatique et de la compression métamorphique ?

Si l'histoire du vivant est si intimement mêlée à celle de notre planète, c'est que la biochimie, c'est d'abord la chimie du carbone - structurale et métabolique - et que la chimie du carbone s'y déploient partout, du haut de l'atmosphère au fond des océans.

On parlera donc du cycle biogéochimique du carbone.

Quelles sont ses étapes ?

Schématiquement :

- la pluie lessive l'atmosphère et transforme le dioxyde de carbone en acide carbonique
- l'acide carbonique attaque les roches et entraîne dans l'érosion du calcium et des carbonates
- ces éléments aboutissent dans l'eau de mer où ils vont être métabolisés par le plancton, en particulier dans la construction des tests et coquilles.

- la nécromasse planctonique (déjections, coquilles) précipite et intègre les couches sédimentaires constitutives de la croûte océanique
- les sédiments sont recyclés en magma, via la subduction
- lors des éruptions volcaniques le carbone retourne en particulier à l'atmosphère, sous forme gazeuse.

La quantité de gaz carbonique qui pénètre dans les couches superficielles de l'océan mécaniquement (haute pressions polaires, houle, déferlement) est libérée intégralement dès que les conditions physico-chimiques le permettent (dégazage tropical).

Par conséquent, hors éruptions volcaniques, la proportion de gaz à effet de serre présente dans l'atmosphère - et donc, à ensoleillement constant, la chaleur moyenne régnant sur les surfaces terrestres - est étroitement corrélée aux différentes modalités de l'activité biologique.

Comme nous l'avons vu, le plancton constitue le maillon indispensable du cycle biogéochimique du carbone.

Comment agit-il ?

Comment les autres formes vivantes interviennent-elles dans ce compartiment climatique ?

Les végétaux, océaniques et terrestres, séquestrent le carbone présent dans leur milieu pour produire, grâce à l'énergie solaire, les protéines et les composés nécessaires à leur croissance. Les animaux se nourrissent des sucres produits par les végétaux - directement (herbivores) ou indirectement (carnivores) - et rejettent dans leur milieu, par la respiration et les déjections, du gaz carbonique et du méthane. Ces gaz sont en partie libérés dans l'atmosphère, en partie séquestrés dans les sols et les fonds océaniques par le biais de la nécromasse. La décomposition aérobie va aboutir en partie au retour, sous forme gazeuse, du carbone dans l'atmosphère, en partie à son recyclage, dans l'humus, par la croissance végétale. La décomposition anaérobie va produire d'une part du méthane, d'autre part du sulfure d'hydrogène, hautement toxique pour les organismes aérobies.

Le bilan que l'on peut faire aujourd'hui de la répartition du carbone (**Doc 14**) fait apparaître de façon nette l'impact incontestable de nos pratiques agricoles et industrielles.

Flux global du carbone biosphère / atmosphère	: 60 Gt /an
Carbone anthropogénique :	
	Energie fossile : 7,6 Gt /an
	Déforestation : 1,5 Gt /an

Puits de carbone :

Océans : 2,2 Gt /an  
Végétation terrestre : 2,8 Gt /an

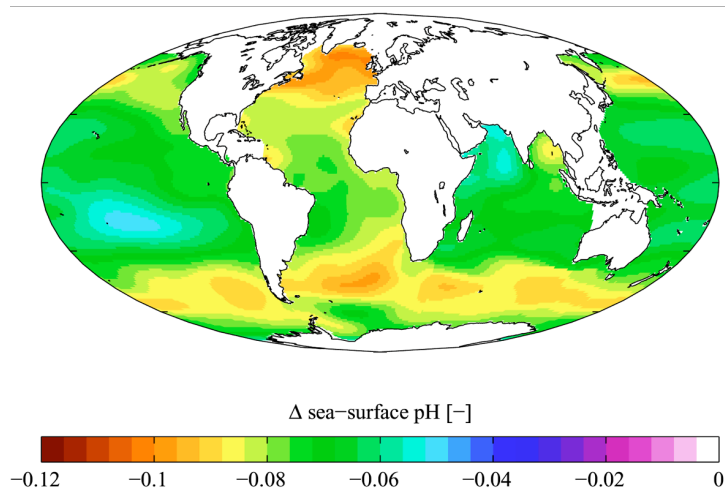
Déficit (carbone s'accumulant dans l'atmosphère) : 4,1 Gt /an

Doc 14 Bilan annuel des flux de carbone. 1 Gt = 1 milliard de tonnes. Source : GIEC

S'il semble que les forêts aient accru leur capacité de stockage à proportion des émissions supplémentaires – effet qui ne persistera qu'à condition qu'on s'abstienne de continuer à les détruire et que les maladies émergentes des arbres ne continuent pas à se développer -, l'océan présente au contraire une rétroaction positive : il s'acidifie.

On a mesuré que depuis 2 siècles le pH<sup>29</sup> des eaux superficielles est passé de 8,25 à 8,14 et on estime que d'ici la fin du siècle, il sera descendu à 7,8. Or comme l'échelle du pH est logarithmique, du pH 8 au pH 7 l'acidité est multipliée par 10. (Doc 15)

Dans un milieu de vie où la valeur d'une constante générale est modifiée d'un tiers en quelques années, il ne peut pas ne pas y avoir d'impact biologique.



Changement estimé du pH des eaux de surface entre 1700 et 1990



Ptérope  
(Thecosomata)



Krill (*Euphausia superba*)

Doc 15

Acidification des océans

De fait la concentration en ions carbonates disponibles a chuté de 30% et on observe une calcification réduite ou imparfaite du zooplancton ainsi qu'une diminution des populations (ptéropodes, krill).

<sup>29</sup> Le Ph (potentiel hydrogène) mesure l'activité chimique de l'ion hydrogène (h+) en solution et donc l'acidité (Ph < 7 ; milieu donneur de protons) ou la basicité (Ph > 7 ; accepteur de protons) de cette solution.

Le zooplancton est le deuxième maillon des chaînes alimentaires océaniques. L'effondrement de ces populations signifie non seulement la disparition de la pêche, avec les impacts socio-économiques que l'on peut imaginer, mais aussi, à terme, la fermeture du puits biogéochimique du carbone et, par conséquent, une progression exponentielle de l'effet de serre et de la déstabilisation climatique.

Par ailleurs la saturation des eaux superficielles – dans lesquelles on sait que se concentre l'essentiel de la vie océanique – en dioxyde de carbone a un effet bien plus rapide et foudroyant : elle empêche la respiration. Celle-ci n'implique pas seulement l'absorption d'oxygène mais aussi l'expulsion du dioxyde de carbone. Or si les poissons et autres organismes marins absorbent bien l'oxygène, la concentration de plus en plus élevée du milieu en dioxyde de carbone, les empêche progressivement de le rejeter dans ce milieu ; il s'accumule dans les tissus et finit par mettre un terme au cycle qui alimente les cellules en énergie ; c'est l'asphyxie. Les blooms algaux induits par la nécromasse disponible interceptent la pénétration du rayonnement solaire et, par voie de conséquence, la synthèse de la chlorophylle par le phytoplancton, ce qui retentit sur toute la chaîne alimentaire. Certaines de ces algues émettent des gaz toxiques.

De fait on a vu sur tous les océans apparaître des zones mortes ; l'ONU en dénombrait 450 en 2008, la plus importante atteignant une surface de 70 000 km<sup>2</sup>. Il y a là une double rétroaction positive, si ce n'est triple : non seulement le puits biogéochimique se ferme, interdisant la séquestration profonde et durable du carbone, mais encore la nécromasse relargue du carbone supplémentaire dans l'atmosphère et induit un déficit supplémentaire de l'oxygène dissous dans l'océan.

Enfin l'acidification est probablement l'un des facteurs du blanchiment des coraux et donc de la disparition des réservoirs de biodiversité océanique (massifs coralliens = 0,1 % de la surface des océans ; = 25 % de leur biodiversité).

Parallèlement les compagnies de pêche industrielle ont développé des méthodes particulièrement agressives qui, en raclant les fonds, ruinent durablement les derniers écosystèmes , en particulier les récifs profonds, récemment découverts.

Au total, il faut s'attendre à une fermeture du puits océanique du carbone. Quant au puits terrestre, il est sous la dépendance étroite des activités humaines ; mais pour évaluer correctement son état et son évolution, il faut préalablement construire une définition schématique du monde.

### III Les caractéristiques du système

On croit généralement que l'Amazonie doit la luxuriance de sa forêt primaire - 700 espèces différentes à l'hectare – à la richesse de ses sols et à l'abondance des pluies.

Les fronts pionniers, qui ont permis au gouvernement brésilien des années 70 de se débarrasser à bon compte des paysans sans terre, ont donné des résultats catastrophiques : coupe à blanc, écobuage<sup>30</sup> (un satellite a compté jusqu'à 17 000 feux pour une seule nuit), plantation, enfin. Mais très vite, en 3 à 5 ans, lessivage des sols, effondrement des récoltes, turbidité des cours d'eau et disparition des poissons. Et après quelques années de friche, implantation d'une végétation de taillis.

En Amazonie, ce sont les feuilles des arbres qui servent de noyaux de condensation à la vapeur d'eau et qui produisent l'humus où ils prennent racines ; et ces sont leurs racines qui retiennent cet humus.

En Amazonie donc, ce n'est pas seulement parce qu'il pleut et que la terre est riche qu'il y a de grands arbres ; c'est aussi parce qu'il y a de grands arbres qu'il pleut et que la terre est riche.

A partir de la roche mère et par l'activité biologique, il faut environ 1000 ans pour qu'un sol se constitue.

Pour les paysans brésiliens, la solution, ce serait l'agroforesterie.

Pour les décideurs, il y a une urgence à concevoir la complexité du monde.

Il ne s'agit pas seulement de comprendre ce qu'est un écosystème ; il importe de rompre définitivement avec la représentation biblique de notre rapport à la nature. La climatologie, comme on l'a vu, convoque et incorpore tous les éléments du système Terre / météores, y compris le vivant.

Cependant le vivant n'est rien de tel que le terme de la création divine, ce en vue de quoi la Terre et les luminaires auraient été préalablement façonnés, l'homme constituant le grand œuvre de cette création, le joyau déposé finalement au centre de l'écrin du monde.

A supposer que cette représentation ait cessé d'être mentalement active – ce dont il y a lieu de douter – nous continuons à cliver obstinément le vivant et l'inerte, à buter, ici ou là, contre ce que Bachelard nommait justement « l'obstacle substantialiste » .

Or la biologie fonctionne sans définition du vivant ; elle a affaire à la chimie complexe du carbone mais avec des éléments – le carbone, l'oxygène, l'hydrogène, l'azote - qui sont abondants dans l'univers. Autrement dit, les molécules organiques qui sont les constituants de base des êtres vivants peuvent être

<sup>30</sup> Méthode de débroussaillage par le feu.

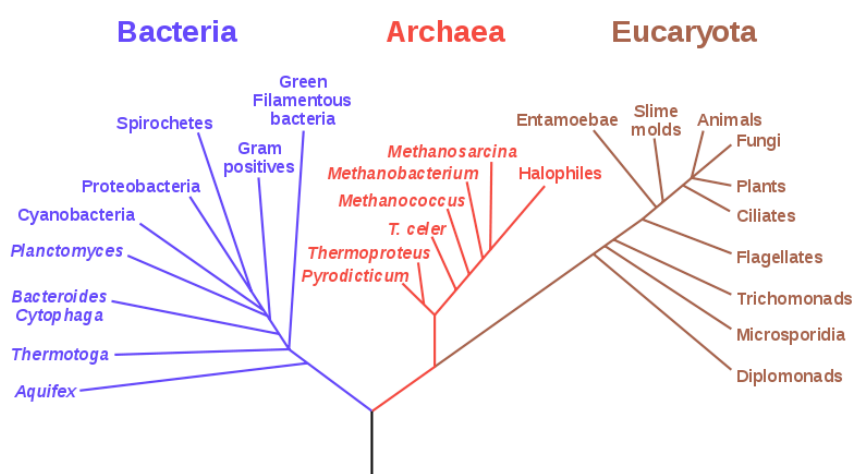


synthétisées partout, sous l'effet de décharges électriques ou de rayonnements énergétiques, et il est hautement probable que la vie existe ailleurs que sur Terre. Dans les ampoules de Stanley Miller qui avait entrepris de prouver expérimentalement cette hypothèse, on a retrouvé, grâce aux méthodes d'analyse récentes, 4 acides aminés de plus que les 10 qu'il avait pu synthétiser dans les années soixante, sur un total de 22 acides aminés protéinogènes. Par ailleurs des hydrocarbures et des protéines ont été trouvés sur des météorites. Comme l'a dit François Jacob, « La vie, c'est du bricolage » et il est probable que la matière vivante se constitue à partir de la matière inerte, sans solution de continuité.

## Phylogenetic Tree of Life

Doc 16

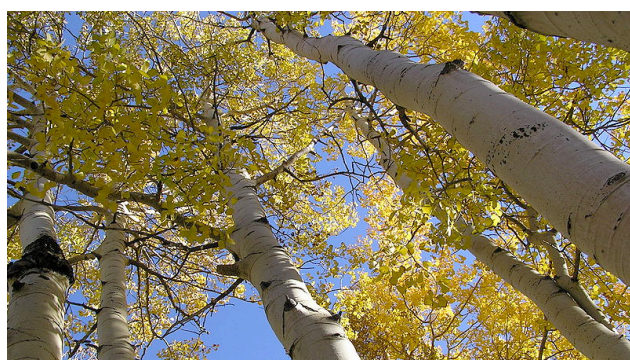
Arbre phylogénétique de Carl Woese, constitué d'après les séquences communes d'ARN,



Ce n'est pourtant pas une histoire simple. « L'arbre de vie » nouvelle manière (Doc 16) nous montre que les plantes, les animaux et les champignons - auxquels nous bornons habituellement notre représentation du vivant - ne représentent, génétiquement parlant, que 3 des 25 règnes ayant séjourné ou séjournant encore sur Terre. Témoignent de cette créativité inépuisable les organismes dits « extrêmophiles », capables de survivre dans des conditions de température, de pH, de pression et de radiation qu'on croyait incompatibles avec la vie.

Ex : *Pyrolobus fumarii* vit et se reproduit encore à 113°C.

Et puis nous ne sommes plus très sûrs de ce qu'est un individu vivant. Une colonie clonale de peupliers faux trembles de l'Utah couvrant 45 hectares et pesant 6 000 tonnes (Doc 17) s'est vu attribuer un nom propre - « Pando » - ce qui en fait le plus vieil organisme terrestre : 80 000 ans.





Doc 17 Pando, forêt clonale Utah
----------------------------------

Nous respirons aujourd'hui la troisième atmosphère de l'histoire de la Terre, patiemment et inexorablement fabriquée par des cyanobactéries pendant 2 milliards d'années, et nous nous déplaçons dans des paysages – dans un sens voisin de celui qu'Elisée Reclus donna à ce terme – façonnés, non seulement par les météores et la tectonique des plaques, mais aussi par les formes de vie qui nous ont précédés.

Le monde est la résultante complexe du vivant et de l'inerte, le fruit d'une histoire longue et tumultueuse ; il est à la fois la mémoire et l'oubli des temps révolus, une succession de floraisons diverses et brèves, de formes variées, apparues et disparues, laissant chacune à la suivante une planète en héritage, remaniée par les aléas du ciel et des abysses, planète de 5 milliards d'années d'âge, où nous sommes les derniers arrivés mais dont nous nous considérons cependant comme les légitimes propriétaires et que nous avons entrepris de réaménager à une vitesse encore jamais atteinte par les formes de vie antérieures.

Ce que nous nommons « cosmos » résulte en réalité d'un emboîtement de systèmes chaotiques, dont la régularité n'est qu'un effet temporaire et se révèle finalement n'être que l'apparence de ce qui se donne à voir à l'échelle de notre passage. Du train où vont les choses, il est probable qu'Homo Sapiens Sapiens n'aura pas le temps d'assister à la fin du rebond post glaciaire de la Norvège.

Ni les jours, ni les années n'ont eu autrefois la même durée.

Pas d'harmonie cosmique, donc, pas d'horloge parfaitement réglée qui désignerait un grand horloger ; mais une intrication complexe, atteignant parfois des équilibres hasardeux et temporaires, où la vie peut fleurir avant de sombrer, pour renaître et s'épanouir encore, après des éons.

Le hasard et la nécessité, donc, mais surtout le temps, « ce grand sculpteur », selon l'heureuse expression de Marguerite Yourcenar ( qui ne savait pas à quel point elle avait raison), sont les ouvriers de la première heure de ce que nous nommons « le monde ».

Dans ce monde, il n'existe rien de tel qu'un environnement dans le sens d'un milieu continuellement disponible, théâtre imperturbable de nos actions et réservoir sans fond où nous pourrions puiser indéfiniment et impunément de quoi satisfaire des besoins sans cesse croissants.

A cet égard « chaotique » n'est pas une métaphore. Ce n'est pas par hasard si la représentation populaire de la théorie du chaos met en scène un papillon des Alpes qui, d'un battement d'aile, finit, de proche en proche, par déclencher un cyclone dans le golfe de Mexique. Les lois qui régissent la mécanique des fluides – et en particulier le comportement de l'océan et de l'atmosphère – ne peuvent être exprimées que par des systèmes d'équations non linéaires. Mais surtout n'importe quel type de forçage peut à tout moment en infléchir la direction.

Ceci implique à la fois :

- le risque : les effets ne sont généralement pas proportionnels aux causes ; en particulier, passé un certain seuil, une faible variation peut induire des changements irréversibles.
- l'incertitude : on peut toujours en droit construire un scénario climatique qui aboutirait au statu quo. D'autre part, même si l'on parvient à corriger les défauts des modèles climatiques actuels, on ne pourra jamais exprimer l'avenir qu'en termes de probabilité.

C'est cette nature chaotique du monde en général et du climat en particulier qui rend compte de ce que, de tout temps, des phénomènes extrêmes ont existé : sécheresses, inondations, grands froids, canicules. C'est l'un des arguments des climato-sceptiques mais aussi, probablement, l'arbre qui nous cache la forêt.

Dans ce système à variables multiples, le vivant est un puissant facteur de transformation ; à bien des égards les hommes constituent le symétrique et l'inverse des cyanobactéries ; celles-ci empoisonnèrent autrefois leur milieu de vie par le déchet oxygène, comme nous le faisons aujourd'hui avec les molécules carbonées ; il n'est d'ailleurs pas exclu que nous préparions leur retour en force.

36 000 années « calendaires » seulement nous séparent de ce que Malraux nommait « la demi bête aurignacienne » et nous n'apercevrons vraisemblablement le point de basculement que quand il sera trop tard. Mais quoi qu'il arrive, nous continuerons d'exister dans la mécanique et dans les annales du monde. C'est pourquoi Paul Crutzen, prix Nobel de chimie 1995, a proposé de rebaptiser l'Holocène « Anthropocène ».

Maat, jeune fille munie d'une plume, figure la déesse égyptienne de la vérité et de la vie. Pourquoi ce rapprochement ? C'est, nous semble-t-il, que la vie, pour se perpétuer, suppose le retour du même et que la vérité n'est prédictive qu'à cette condition. Vie et vérité s'ancrent ainsi dans la régularité, laquelle, dans le monde tel que nous apprenons à le connaître, ne peut procéder que d'un équilibre précaire.

Il y a 5500 ans le grand jardin saharien a passé lui aussi le seuil critique : l'insolation diminue et les moussons faiblissent ; l'évaporation devient dominante et la végétation se dégrade ; l'aridité s'installe et les Sahariens, mangeurs d'escargots, se replient sur les marges. Ils ont laissé des gravures rupestres qui témoignent de la présence de vaches, d'antilopes, de gazelles et d'éléphants. A Djelfa on a aussi retrouvé « les amoureux timides ». C'est peut-être cette terrible histoire que se sont transmis ceux de leurs descendants qui ont migré « à l'est d'Eden » et il se peut que « l'ange à l'épée de feu », chargé selon la Bible d'en interdire l'entrée, soit la transposition poétique d'un soleil désormais meurtrier.

Faut-il craindre pour l'avenir de l'humanité actuelle quelque chose d'analogue ?

## **B La problématique actuelle**

### I La polémique

Hakan Grudd, climatologue, a fait savoir qu'une courbe de température issue de ses travaux et reproduite par Claude Allègre dans « L'imposture climatique » avait été falsifiée.

Maxime Debret, autre climatologue, fait un rappel révélateur des principes de base de l'analyse d'un signal climatologique :

- ne traiter que des données brutes
- choisir judicieusement son pas d'échantillonnage
- éviter les sur-échantillonnage
- tester son ré-échantillonnage
- compléter un trou dans une série de relevés par un « bruit gaussien »
- indiquer les intervalles de confiance

On comprend mieux pourquoi M. Allègre s'est cru autorisé à « remanier » la courbe de son collègue.

Cet épisode, comme celui du rapport de l'Académie des sciences sur le réchauffement climatique fait apparaître un problème de fond :

on ne peut établir en la matière que des probabilités.

Cela tient en partie à la complexité de la machinerie climatique, en partie aux méthodes et aux modèles dont disposent les climatologues, en partie à la texture même du réel.

S'agissant des modèles, il y a trois problèmes majeurs qui sont autant de sources d'incertitude :

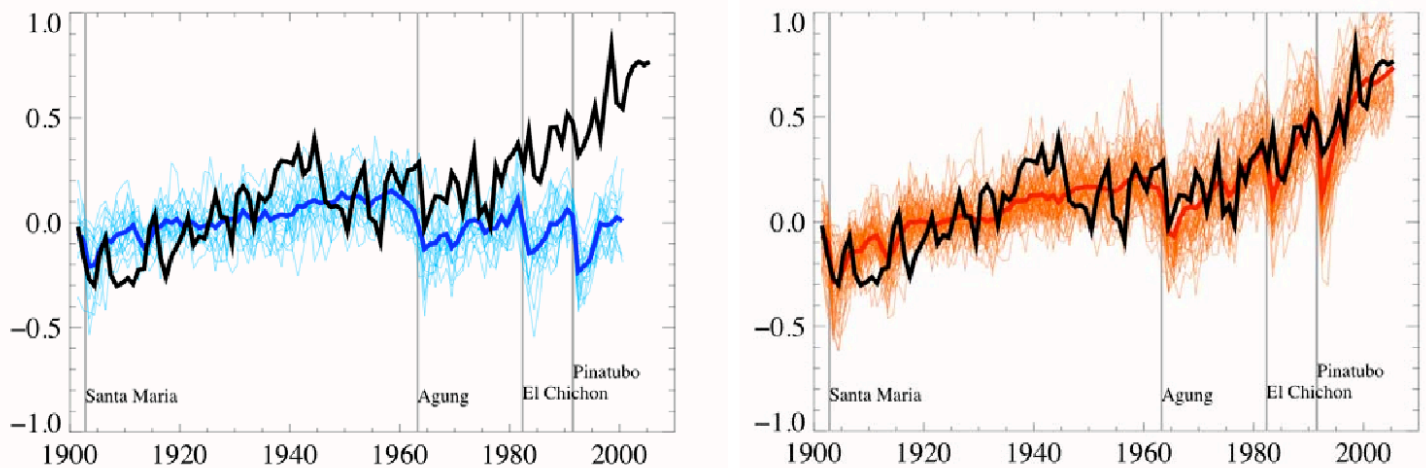
1° On n'est pas actuellement capable de modéliser correctement les nuages et d'aboutir à un bilan global de l'évolution et de l'impact de la nébulosité.

2° Les micro phénomènes susceptibles d'exercer un forçage ne sont pas intégrés parce que la taille actuelle du maillage (150km x150km) ne le permet pas.

3° les capacités actuelles des ordinateurs sont limitées et il faut

- \* soit réduire la durée des projections (actuellement à 100 ans)
- \* soit augmenter la taille des mailles, lesquelles, on l'a vu, sont déjà trop grandes.

En attendant les super calculateurs quantiques, un résultat semble prouver que l'on est malgré tout sur la bonne voie : si on simule les variations climatiques naturelles, (Doc 18) on obtient des températures sensiblement plus basses que celles qui ont été enregistrées pour le XX<sup>e</sup> siècle ; par contre les deux courbes se recouvrent si on inclut dans la simulation les émissions anthropogéniques de gaz à effet de serre.



Doc 18 Deux simulations issues des modèles climatiques (courbes des températures réelles en

Quant aux substrats variés sur lesquels portent les analyses, deux maîtres mots feront comprendre toute la difficulté de la tâche :

1° : le « proxy » ou indicateur proximal

le terme, importé de l'informatique, désigne en climatologie un indice indirect de l'action prévalente, à un moment donné, de tel ou tel élément de forçage.

Quelques exemples : les rapports isotopiques du carbone et de l'oxygène, la géomorphologie, les reliquats organiques divers, la succession de ces différents éléments dans les carottes glaciaires ou océaniques, et c...

2° : le biais

le terme désigne le fait qu'un « proxy » puisse induire en erreur.

Ex : les climatologues tenaient, jusqu'à une époque récente, les cernes de croissance des arbres comme des indicateurs parfaitement fiables de la température et de l'humidité régnant dans un paléo milieu donné. Or deux biologistes ont récemment mis en évidence l'existence d'un système de régulation thermique chez les arbres.

En définitive, il y a matière à poursuivre indéfiniment la polémique. Pour éviter un enlèvement contreproductif, nous utiliserons à notre tour quelques proxies.

## II Réalité de l'effet de serre additionnel

En novembre 2011 la CIA était sommée par le gouvernement américain de bien vouloir communiquer à différentes agences gouvernementales les renseignements collectés dans son rapport « Tendances et implications du changement climatique pour la sécurité nationale et internationale ».

Par ailleurs les bactéries, les plantes, les animaux ont commencé à se déplacer, sans attendre le résultat des débats sur l'ampleur et l'origine du changement climatique.

Quelques aperçus :

- Alpes : la forêt a commencé à se déplacer en hauteur, les arbres trouvant les conditions habituelles en altitude.
- Mer du Nord : le plancton d'eau chaude remplace progressivement le plancton d'eau froide et 20 nouvelles espèces de poissons s'y sont installées en moins de 20 ans.
- France : tous les vigneron ont constaté que la vigne fleurit plus tôt, qu'il faut avancer la vendange de 2 à 4 semaines et que le degré d'alcool du vin augmente.  
L'ambrosie est invasive et comme c'est un puissant allergène, on a créé un observatoire de l'ambrosie...
- Arctique : si l'ours blanc paraît condamné, les espèces invasives pullulent sur les territoires limitrophes : chats, lapins, et pissenlits.

D'autres espèces ne survivront probablement pas :

- la faune et la flore endémiques des petites îles à faible relief sont condamnées ; il n'y aura pas, pour elles, de solution de repli.

Globalement la situation d'une grande partie des espèces végétales terrestres risque d'être catastrophique. Si le relief permet de coloniser, sans grands déplacements, un milieu climatiquement comparable au milieu d'origine, c'est autre chose en plaine. Tout laisse à penser que les lignes isothermes se déplaceront beaucoup plus rapidement que la végétation (estimation : 5,6 km / an). A titre d'exemple, à partir du réchauffement interglaciaire, commencé il y a 10 000 ans, il a fallu 2 000 ans

aux chênes remontant de la Méditerranée pour s'établir sur la totalité du territoire français, soit 565 m / an sur la base de la distance Lille – Perpignan.

- les rennes et caribous, du fait d'hivers pluvieux à répétition, ne peuvent plus se nourrir, la végétation étant englacée. Au Canada la population des caribous de Peary est passée, en quelques années de 50 000 à 1 000 individus.
- on sait comment *Caulerpa taxifolia*, algue d'origine tropicale, a commencé à coloniser la Méditerranée, éliminant peu à peu les herbiers de posidonies et les riches viviers d'espèces marines qu'ils constituaient. Comme on a affaire à une mer fermée, toutes les espèces endémiques sont condamnées à terme. Sur le même mode, la réouverture du passage du Nord-ouest en Arctique a enclenché la colonisation de l'Atlantique par une petite algue du Pacifique, *Neodenticula Seminae*, absente du bassin depuis 800 000 ans et qui vient d'atteindre la latitude de New York. On considère qu'un tiers des espèces atlantiques sont menacées et 7 %, dorés et déjà condamnées ; les autres migreront vers le Nord et ont probablement déjà commencé à le faire.
- depuis 30 ans toutes les populations d'amphibiens du globe s'effondrent ; on a déjà perdu 80 % des grenouilles, crapauds et autres batraciens et 61 espèces sont considérées comme disparues. Ces populations sont probablement fragilisées par les effets conjugués des pesticides agricoles et de la raréfaction des zones humides ; ils sont en outre particulièrement sensibles aux ultraviolets et, par conséquent, à la déplétion de la couche d'ozone. Mais tout cela ne fait que préparer le terrain ; le facteur déclencheur est ailleurs : ce sont les compétences accrues des ravageurs.
- Globalement, on estime que le taux d'extinction actuel est 100 à 1000 fois supérieur aux taux antérieurs ; c'est pourquoi les naturalistes envisagent le phénomène actuel comme la 6<sup>e</sup> extinction de masse de l'histoire de la Terre et le désignent sous le nom de « extinction de l'holocène ». Ils estiment qu'à l'heure actuelle :
  - = 3 plantes sur 4
  - = 1 espèce d'oiseaux sur 8
  - = 1 mammifère sur 4
  - = 1 amphibien sur 3                    sont menacés.

Les maladies émergentes paraissent être, elles aussi, indicatrices d'un changement climatique. Leur critère est une mutation de l'agent, ou une modification de son vecteur, de son hôte ou de son pouvoir pathogène. Tout cela se traduit habituellement par une extension de l'aire de la maladie ; il semble, en particulier que les pathogènes

trouvent dans le déplacement des vecteurs rendu possible par les modifications du milieu l'opportunité d'infecter de nouveaux hôtes.

Quelques exemples :

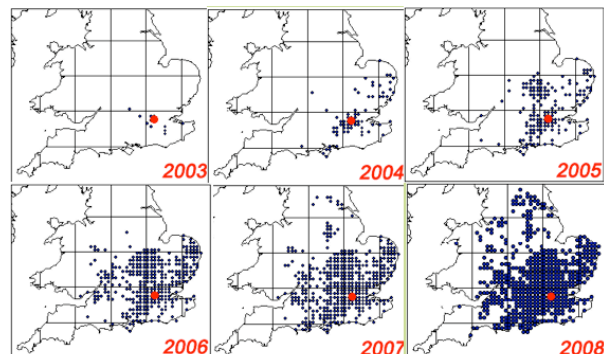
- la fièvre catarrhale du mouton, dite « maladie de la langue bleue », a fait depuis quelques années son apparition dans l'hémisphère nord.
- les batraciens sont victimes d'un champignon (*Batrachochytrium dendrobatidis*), d'un parasite (*Ribeiroia ondratae*) et de plusieurs ranavirus.
- les marronniers d'Europe de l'Ouest sont tous malades (**Doc 19**).

Deux responsables :

la mineuse du marronnier (chenille de *Cameraria ohridella*) et le chancre bactérien (souche mutante de *Pseudomonas syringae*). Comme la chenille processionnaire du pin, jusque là cantonnée grosso modo au sud de la Loire, a récemment atteint la région parisienne, il y a quelques soucis à se faire pour les parcs et jardins d'Ile-de-France. D'autant que les épicéas, les ormes, les mélèzes et même les sapins de Douglas - qui ont fait pendant de longues années le bonheur de la foresterie de rente - sont malades, eux aussi.



Feuille de marronnier attaquée. En médaillon, la teigne, ou mineuse du marronnier (*Cameraria ohridella*)



Expansion de la mineuse du marronnier en Grande-Bretagne  
(le point rouge symbolise la zone d'infection d'origine).

Doc 19 Mineuse du marronnier. Impact et diffusion

Dans tous ces cas, la configuration est formellement la même : l'arbre est fragilisé par la détérioration des sols, les pulvérisations répétées d'insecticides et de fongicides, l'acidité des pluies et les modifications climatiques ; comme celles-ci produisent parallèlement le déplacement des biotopes des ravageurs - dont les facultés d'adaptation sont, au contraire de celles de l'arbre, élevées - de nouvelles maladies émergent et elles sont d'autant plus destructrices qu'elles agissent simultanément sur les mêmes hôtes. C'est ce qui explique le taux élevé d'espèces végétales menacées.

Il y a tout compte fait, un certain optimisme à estimer que les animaux ne seraient menacés qu'à 25% quand les plantes le seraient à 75%...

Si on laisse faire, seules les espèces cosmopolites - par exemple les fourmis et les lentilles d'eau - ne seront pas affectées, d'autant que la disparition de la végétation, c'est le puits de carbone terrestre qui se ferme.

En attendant, il faut s'attendre à d'importants problèmes sanitaires :

- on relève une augmentation des maladies transmises à l'homme par les tiques, directement comme la maladie de Lyme, ou bien avec un hôte intermédiaire, généralement le chien ; c'est le cas des rickettsioses. Des chercheurs ont mis en évidence le rôle de la hausse de la température dans cette augmentation. Un article de Nature de 2008 nous apprend que la plupart des maladies émergentes sont des zoonoses, c'est-à-dire susceptibles de passer la barrière inter espèces entre l'animal et l'homme, comme la grippe aviaire, par exemple.

Globalement les maladies transmises par les insectes sont celles qui ont connu la plus forte augmentation ; tiques, mais aussi punaises et surtout moustiques sont des vecteurs particulièrement efficaces. C'est par l'intermédiaire du moustique tigre, nouveau venu en Europe, que le chikungunya et la dengue ont abordé à Marseille. Parallèlement l'accroissement de l'aire de répartition des anophèles peut laisser craindre un développement du paludisme ; en France 1/3 des nouveaux cas répertoriés chaque année procède d'une contamination hors zone (dont paludisme dit d'aéroport).

On objectera que la multiplication des transports, hommes et marchandises, et l'apparition de résistances induites par des antibiothérapies à outrance sont tout à fait à même de rendre compte de cette explosion. Sans doute ; cependant les statistiques font apparaître une progression exponentielle des maladies émergentes qui ne peut trouver là sa seule explication. Selon l'OMS elles sont désormais tenues pour responsables de 33% des décès dans le monde (rapport 1997) ; leur nombre a été multiplié par 4 en un demi siècle et la fréquence des épidémies de maladies émergentes est en constante augmentation : SIDA, SRAS, fièvre d'Ebola, fièvre du Nil, grippe H1N1, H5N1, et c...

Les hommes ne sont pas étrangers au monde et, sur le plan climatique, ils ne sont pas plus ou pas moins naturels que les autres composantes du système. Ce que nous nommons la nature n'est pas une entité autonome qui serait en outre douée du pouvoir de régulation et se signifierait par la permanence. Toute régularité est temporaire et, par conséquent, toute catastrophe est possible.



L'un des reproches adressés par Vincent Courtillot aux experts du GIEC<sup>31</sup>, c'est d'avoir prétendu que la probabilité d'un réchauffement anthropogénique était de 90% alors que, selon lui, elle ne serait que de 50%.

Encore une fois, le problème n'est pas là et ce n'est pas parce que le changement serait naturel qu'il faudrait laisser faire.

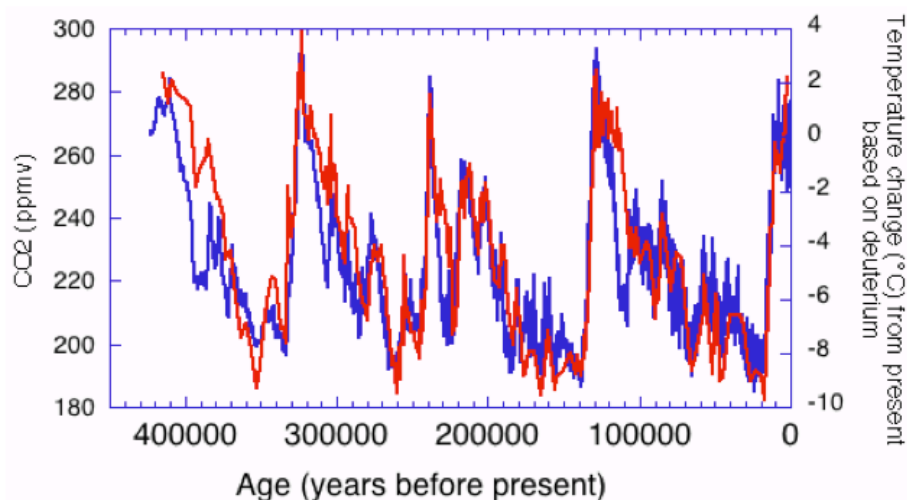
S'il importe de comprendre la structure et la dynamique de l'événement actuel, c'est parce qu'il faut dès maintenant agir adéquatement et, en particulier, protéger les plus vulnérables.

### III Données numériques et physico-chimiques

La déstabilisation climatique s'est traduite ces dernières années par des records de chaleur ; nous venons de traverser les deux décennies les plus chaudes jamais mesurées et 2011 a été, de toutes les années enregistrées, la plus chaude. Depuis un siècle, les températures s'élèvent 10 fois plus rapidement que lors des transitions glaciaire / interglaciaire.

Parallèlement les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre ont connu une croissance exponentielle. Comme on observe depuis quelque temps un réchauffement de la basse troposphère et un refroidissement de la basse stratosphère, l'hypothèse d'un forçage solaire direct est définitivement exclue.

Indépendamment de la question de l'origine, la Terre a toujours connu dans le passé une corrélation étroite entre la température moyenne globale et la teneur atmosphérique de ces gaz (Doc 20). Depuis un siècle celle-ci s'est élevée de 0,6°C, ce qui est commensurable avec l'écart glaciaire / interglaciaire (6°C).



Doc  
20

Temperature change (blue) and carbon dioxide change (red) observed in ice core records.

National Climatic Data Center. U. S.

<sup>31</sup> Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat ; acronyme anglais : IPCC.

Le niveau des mers s'élève : 1,8 mm / an ces 5 dernières années<sup>32</sup>. Du fait de l'incompressibilité de l'eau et des différentes oscillations océaniques, cette hausse n'est pas uniforme ; elle atteint par exemple 3,3 mm / an dans les régions du Pacifique exposées à l'ENSO. La hausse actuelle est essentiellement le fait de l'expansion thermique des océans et on prévoit que du seul fait de celle-ci, elle atteindra 25 cm à la fin du siècle.; mais la part de la fonte des glaciers va progressivement majorer le total avec une prévisible accélération. Entre 1995 et 2005 la perte de glace s'est traduite par une hausse globale des océans de 1mm. Ceci n'exclut nullement un événement catastrophique. Au Groenland le Jacobson a atteint récemment la vitesse d'écoulement de 13 kms / an et engendre un vêlage massif. La fonte observée actuellement dans l'Ouest antarctique, si elle devait se poursuivre, se traduirait à terme par une hausse totale de 4 m du niveau des mers. A titre indicatif, la calotte antarctique représente à elle seule 70 % de l'eau douce disponible sur Terre. La perte annuelle de glace pour l'ensemble du globe est estimée actuellement à 300 milliards de tonnes.

Parallèlement à ces fontes, on observe un ralentissement de la formation des eaux profondes au large du Labrador et des îles Féroé, estimé à 3 % l'an depuis 1995. D'autre part les courants équatoriaux intermédiaires profonds du Pacifique (1 Sv) ont changé de sens en l'an 2000.

Les météorologues ont inventé récemment le terme « medicanne », abréviation de « mediterranean hurricane », pour désigner les ouragans nouvellement apparus en Méditerranée ; ça n'est pas une vue de l'esprit : le 25 octobre 2011 une mini tornade ravage les rues de Sanary-sur-mer, dans le Var ; le 5 janvier 2012 les vents atteignent la vitesse record 200km/h sur le Cap Corse.

Sur ces bases, qui font l'objet d'un consensus, quelles projections opérationnelles peut-on faire ?

#### IV Fragilité de l'assise humaine

L'acidification, le réchauffement et l'hypoxie des couches océaniques superficielles, à quoi il faut ajouter, avec le ralentissement de la circulation thermohaline, la moindre remontée de nutriments, sont autant de facteurs qui concourront à l'extinction massive de la vie dans les océans. Or ½ milliard d'êtres humains vivent de la pêche en mer.

<sup>32</sup> Les mesures, très précises, sont réalisées par marégraphe et satellite.

La disparition du puits océanique est d'autant plus probable que c'est dans les mers polaires que s'opère cette séquestration et cette plongée thermohaline et que c'est aussi dans ces mers que l'acidification est la plus importante, puisque la solubilité du dioxyde de carbone est plus élevée en eaux froides.

D'autre part, un réchauffement induit par un renforcement de l'effet de serre, parce qu'il sera, contrairement au rayonnement solaire, comparativement plus élevé dans les zones froides, risque de ruiner tous les précaires équilibres qui constituent nos climats locaux et, avec eux, les écosystèmes qui en dépendent.

Dans le monde comme il va, tout cela a probablement déjà commencé. Comme pour les glaciations antérieures, les choses se font progressivement : quelques mètres de banquise en moins, une compagnie d'oiseaux qui s'effondrent, morts, sur la route, des villas envahies par la mer... Nous ne voyons là que des accidents. Tant que nous n'assistons pas à un événement – car c'est un événement que nous attendons – nous ne trouvons pas qu'il y ait lieu de nous alarmer.

La prudence et l'humanité commandent cependant d'anticiper sur de prévisibles catastrophes, afin de mettre en place les dispositions et les dispositifs qui permettront peut-être de les éviter.

Deux axes de réflexion :

### 1) Répartition géographique des populations

Octobre 2011 : inondations catastrophiques en Thaïlande, en Birmanie et au Cambodge. Bangkok est sous 1m d'eau ; 12 millions d'habitants fuient la ville, bientôt envahie par les serpents et les crocodiles ; 200 000 hectares de rizières sont noyés. Août de la même année : l'ouragan Irène arrive au large de New York ; les autorités ordonnent l'évacuation de 250 000 personnes résidant dans les bas quartiers.

Un tiers de l'humanité vit en zone côtière ; 160 millions de personnes à moins d'un mètre au-dessus du niveau actuel de l'eau, 450 millions, à moins de 2 m et toutes se trouvent dorénavant et déjà exposées à des phénomènes climatiques violents.

La montée du niveau des mers signifie aussi la régression des deltas, la contamination de nappes phréatiques et la dégradation des terres agricoles.

Mais il n'y a pas plus d'uniformité sur ce plan que sur les autres. La surcote se trouvera amplifiée, ici ou là, par les marées, les basses pressions, la ligne de côte, la direction des vents et celle des courants.

En Atlantique Nord on a enregistré une augmentation de 0,1 à 0,3 m de la hauteur des vagues.

Aux Maldives, 10% des îles ont déjà disparu sous les eaux et les autres sont menacées par la conjonction des tempêtes à répétition et de la disparition des barrières naturelles : récifs coralliens décimés par les modifications de température et l'acidification, mangroves détruites par les aménagements touristiques.

Comme le gouvernement actuel a compris que les Maldives étaient condamnées, il a investi dans l'édification d'une île artificielle, à 3 m au-dessus du niveau de la mer, et tente de restaurer les récifs en implantant, sur des cadres de béton, des coraux résistants à la chaleur, de façon à accroître les bénéfices de l'industrie touristique et à pouvoir acheter, d'ici à quelques décennies, quand il faudra abandonner définitivement ce qui restera des atolls, des terres pour les Maldiviens.

Ils ne seront pas les premiers réfugiés climatiques. Le Bangladesh connaît des inondations catastrophiques et la perte terrestre pourrait y atteindre, dans les mêmes délais, 17 % des terres. Les climato-sceptiques n'ont pas manqué de relever que, du fait d'un réseau hydrographique particulièrement fourni, le Bangladesh connaît aussi une accrétion des terres par dépôt des alluvions dans les deltas. Mais l'accrétion ne suffit pas à compenser l'érosion et le bilan s'élève à 7700 hectares de terres perdues chaque année. Comme le Bangladesh est la première nation victime du changement climatique, il a demandé à l'ONU un dédommagement de la part des principaux états émetteurs de gaz à effet de serre.

L'Organisation Internationale des Migrations<sup>33</sup> a conceptualisé la notion de « migrant environnemental ». l'ONU estime que 20 millions de personnes relèvent doré et déjà de cette catégorie et que 8 à 50 millions de personnes supplémentaires pourraient les rejoindre dans les prochaines années.

Le Sénégal, la Louisiane, la Floride sont également menacés. Même les Pays-Bas, que leurs digues ont rendu célèbres, devront, selon les projections sur un siècle, céder 6% de leur territoire, en particulier parce que la hausse des eaux devrait atteindre 1 m dans l'Atlantique nord. Les Néerlandais ont commencé à construire et à commercialiser des maisons et des infrastructures flottantes.

L'érosion côtière, déjà perceptible, sera renforcée de façon importante dans certaines zones. Par exemple si cette érosion est en moyenne de 0,5 m / an pour les littoraux arctiques, elle atteint déjà sur les rivages de la mer de Beaufort, autrefois ceinturée par la banquise, 8 m / an. En Europe, pour la période 1999 – 2002, la surface perdue a été de 15 km<sup>2</sup> / an.

Au XX<sup>e</sup> siècle, l'érosion des côtes sableuses a concerné 70% des littoraux., et l'accrétion, 10%.

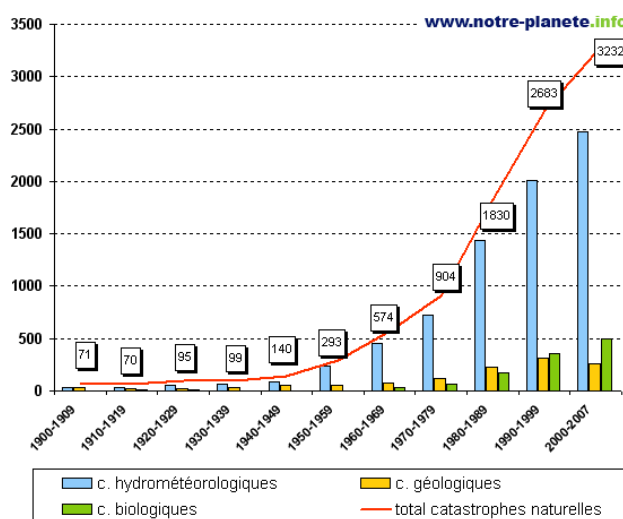
<sup>33</sup> Organisation basée à Genève et issue d'une structure antérieure chargée de régler les problèmes de déplacement des populations après la seconde guerre mondiale.

Ces variations peuvent encore rencontrer localement des facteurs avec lesquels elles entrent en interaction. Ainsi le Pacifique s'est-il, en 50 ans, globalement réchauffé de 0,5°C, ce qui provoque à la fois l'aggravation des tempêtes et le renforcement des moussons. Cependant le boom démographique et le décollage économique des deux géants du continent asiatique, la Chine et l'Inde, se sont traduits par la formation en altitude d'un énorme<sup>34</sup> nuage de pollution<sup>35</sup>, permanent de décembre à avril, qui, du fait qu'il intercepte le rayonnement solaire, a un effet refroidissant. En dehors de son impact sanitaire – on lui attribue plusieurs centaines de morts par an – il dévie vers l'Est la montée des masses de vapeur du Pacifique et leur condensation ; les précipitations sont donc, elles aussi, décalées vers l'Est, ce qui induit à la fois une pluviosité accrue en mer et une modification du régime des pluies sur le continent indien, avec assèchement relatif du bassin du Gange et pluviosité accrue dans le Nord Est.

En un siècle le nombre des catastrophes hydrométéorologiques ( inondations, sécheresses, tempêtes, ouragans, cyclones) a été multiplié par 50 (Doc 21 ) et le taux de croissance du nombre des victimes est à peu près 5 fois plus élevé que celui de la population. Ceci tient en particulier au fait, qu'à l'exception des contreforts de l'Himalaya, les plus hautes densités de population sont généralement atteintes dans les zones littorales ou proches. Sans doute faut-il y voir l'effet conjugué de la géologie (plaines alluviales et nappes phréatiques) et de l'héritage historique (transport fluvial et commerce maritime). Le cas du Japon est emblématique : c'est sur une étroite bande côtière, de 13 kms de large en moyenne, que se concentrent les villes, les zones agricoles, les entreprises industrielles et les infrastructures de transports.

Doc 21 Source : Université catholique de Louvain  
2007

Bilan des catastrophes naturelles dans le monde par type



Ceci dit, les ouragans et cyclones ne resteront pas le seul facteur de déplacement massif des populations. La désertification et la perte de terres arables auront des effets comparables. En Chine, le désert de Gobi progresse de 10 000 km<sup>2</sup> par an et refoule depuis des années les paysans vers l'Est et le Sud ; ici ce sont les méthodes culturelles qui ont constitué le facteur déclencheur. Au Sahel, c'est la sédentarisation forcée qui a accéléré le processus.

<sup>34</sup> 3000 m d'épaisseur ; surface équivalente à celle des Etats-Unis.

<sup>35</sup> Il est composé d'oxyde de carbone et d'azote, de suie, d'aérosols soufré et d'ozone, gaz issus pour partie des pratiques agricoles traditionnelles, pour partie des nouveaux effluents industriels.

Les deux cas sont d'ailleurs comparables : on défriche pour pouvoir planter ou on force les troupeaux à rester sur place. Les petites graminées qui pouvaient survivre dans ce milieu très sec ( une pluie ou deux par an ) avec un système racinaire superficiel très étendu, ne sont plus là pour retenir le sol ; comme l'érosion éolienne survient à partir d'une pente de 5%, ce qui se trouve partout, la mince couche d'humus commence à s'envoler. Parallèlement, on a évidemment irrigué ; mais dans ces zones, le sol est à dominante évaporitique ; ça signifie que non seulement le soleil volatilise l'eau de l'irrigation mais encore qu'il prélève une partie de la faible humidité résiduelle ; autrement dit, plus on irrigue, plus on assèche. Voilà pourquoi tous les paysans du sud Sahel « marchent au sud ». En Chine, on a bien essayé de planter des arbres pour retenir le sol mais on ne restaure pas si aisément un écosystème si fragile ; les arbres ont été ensablés... et les maisons aussi. L'irrigation à outrance a un autre effet pervers : la salinisation. L'eau douce, qui est par ailleurs une ressource précieuse, se charge, par érosion, d'une faible quantité de sel. C'est cette érosion imperceptible qui, parce qu'elle s'est poursuivie pendant des millions d'années, explique la salinité des océans. Quand on irrigue massivement en zone tropicale, on accroît le dépôt de sel à la vitesse de l'évaporation et on finit par rendre le sol impropre à la culture. En Egypte, c'est déjà le cas de 50% des terres cultivées.

On n'est pas plus heureux en zone polaire. Partout où le pergélisol fond, le sol se déstabilise et les constructions et infrastructures sombrent dans la boue. Au Canada on a entrepris de faire passer des tuyaux réfrigérants dans le sous-sol pour maintenir les maisons d'aplomb. Jusqu'à quand ? Le réchauffement se poursuivant, les tuyaux eux mêmes finiront par sombrer.

Le GIEC, quant à lui, prévoit 150 millions de réfugiés climatiques d'ici à la fin de ce siècle. On conçoit bien que les choses ne se passeront généralement pas de la façon amène avec laquelle les Maldiviens les envisagent et que ces déplacements engendreront inévitablement un accroissement des tensions sociales et internationales, d'autant plus sûrement que la déstabilisation climatique aura un impact conséquent sur les ressources alimentaires. La Chine qui représente 22% des habitants de la Terre, ne possède que 10% de ses terres agricoles ; elle a donc entrepris de racheter des terres arables et possède actuellement 30 millions d'hectares, hors frontières, pour l'essentiel en Afrique (chiffres 2011). Que se passera-t-il le jour où des Africains affamés s'approcheront des champs chinois ?

## 2) Le problème de la sécurité alimentaire.

La multiplication des maladies des arbres nous a semblé un indice du déplacement des biotopes ; on observe un phénomène équivalent avec les ravageurs des cultures : phylloxera du poirier, cératites des fruits venue d'Afrique. La maladie de Pierce peut atteindre indifféremment pêchers, amandiers, luzerne, vigne, agrumes, chênes, érables

et se développe à la faveur d'hivers doux. Egalement significatives sont les plantes invasives des cultures ; le sycios prolifère depuis quelque temps dans les champs de maïs ; les plants peuvent atteindre 7 m de longueur et briser plusieurs rangées de pieds avec leurs vrilles.

D'autres maladies des cultures se répandent par temps humide ; leurs vecteurs sont des champignons. C'est le cas de l'antracnose dont les différentes souches sont parvenues à infecter une variété considérable de plantes et d'arbres : maïs , fraisiers, haricots, poires, tomates, luzerne, cerisiers, framboisiers, groseilliers, vigne ; en outre elle favorise d'autres ravageurs.

Parallèlement les espèces invasives supplantent, ici ou là, les espèces natives, agricoles ou non ; en France, on en dénombre 243.

Tout ceci paraît évidemment justifier la lutte contre les ravageurs.

Le problème, c'est que l'usage intempestif des pesticides a fini par détruire les sols. Les agronomes qui tentent vainement d'alerter sur ce problème<sup>36</sup> estiment que 80% des organismes terricoles ont été éliminés. Or ces champignons, vers de terre et micro-organismes<sup>37</sup> sont les principaux agents du renouvellement de la richesse nutritive, de la capillarité et de la cohésion du sol ; ce sont eux qui permettent la croissance végétale spontanée.

Dans le même temps l'emploi des machines induit des tassements également destructeurs et appelle le labourage mécanique profond, lequel a pour effet de dissocier et d'enfouir en profondeur le complexe humus / argile qui constitue la couche biologiquement active du sol. Il en résulte que sans les intrants que sont les pesticides et les engrais, les paysans n'auraient plus de récoltes.

Enfin l'irrigation à outrance induit la salinisation tandis que le défrichage systématique sur grandes surfaces enclenche l'érosion éolienne. C'est l'histoire du « dust bowl » nord américain qui, de 1930 à 1940, submergea sous des tonnes de sol réduit en poussière, les champs, les machines et les fermes.

Dans les pays développés le sol a donc cessé d'être une entité vivante pour devenir un pur support technique et ces méthodes culturales ont surtout profité aux grands propriétaires terriens et aux industries agro-alimentaires.

Néanmoins la Commission Européenne estime que la dégradation des sols est devenu un problème grave et qu'elle affecte, à un degré ou à un autre, tous des pays de l'Union. Selon une estimation de 2006, 33 millions d'hectares sont sérieusement

<sup>36</sup> Notamment Marc Dufumier et Claude Bourguignon.

<sup>37</sup> Il y en aurait des milliers d'espèces et nous n'en connaissons que 5% environ.

dégradés, 115 millions sont sujets à l'érosion hydrique, 42 millions, à l'érosion éolienne et 3,5 millions, lourdement contaminés.

L'exportation de ce modèle agricole dans le tiers-monde constitue une véritable catastrophe.

D'abord parce que les dégradations induites sont beaucoup plus rapides, notamment la salinisation et la désertification : on estime que 10 millions d'hectares de terre arable sont emportés chaque année par l'érosion.

Ensuite parce que l'explosion démographique, en multipliant les besoins et en réduisant les surfaces disponibles du fait de l'extension des villes, pousse fortement à son adoption, alors même que les paysans ne disposent généralement pas des fonds nécessaires pour se procurer les intrants indispensables.

Enfin parce que le modèle économique occidental a promu partout le développement des productions rentières au détriment de l'agriculture vivrière.

En attendant de faire fortune avec leurs exportations, un grand nombre de ces pays ont perdu leur autosuffisance alimentaire.

C'est sur ce terrain déjà fragilisé que la déstabilisation climatique risque, dans un proche avenir, de faire sentir ses effets destructeurs et d'autant plus sûrement qu'elle se conjuguera avec ce qu'on nomme avec raison « la bombe démographique ».

Bref rappel :

- 1800 : 1 milliard de terriens
- 1960 : 3 milliards
- 2011 : 7 milliards

En 1984, du fait d'aléas climatiques importants, les récoltes de céréales s'effondrent en Amérique du Nord et en Asie ; heureusement le 3<sup>e</sup> grenier à grains de l'époque, l'Europe, est excédentaire et va donc exporter dans le reste du monde. Depuis le Brésil a connu un développement agricole notable mais, comme on l'a vu, l'Asie parvient difficilement à nourrir ses habitants.

Les céréales constituent la base de l'alimentation des deux tiers de l'humanité. D'une année sur l'autre, le ratio stock / utilisation tourne autour de 18 %, soit l'équivalent de 65 jours de réserve.

De là une question qu'on ne peut éluder : que se passera-t-il l'année où les récoltes seront partout mauvaises ?

Trois épisodes significatifs :

1998 – Forte sécheresse en Russie ; déficit de 19 millions de tonnes sur les prédictions de la FAO<sup>38</sup>. Inondations considérables en Asie.

<sup>38</sup> Food and Agriculture Organisation : organisation des Nations Unies pour l'autosuffisance alimentaire.



> 40 pays connaissent des pénuries alimentaires dont la moitié en Afrique.

2007- L'Afrique est dévastée par les sécheresses et les inondations. Le criquet pèlerin ravage le Soudan et le Yémen. La peste porcine se répand en Arménie et en Georgie et la fièvre catarrhale ovine fait son apparition au Royaume -Uni. Au Bangladesh un cyclone ravage 92 000 hectares de cultures.

Les pénuries et le prélèvement des biocarburants (les Etats-Unis consacrent déjà 150 millions de tonnes de maïs à la production de bio éthanol) font monter les prix agricoles en flèche.

> En juin le total des importations alimentaires atteint déjà le chiffre record de 400 milliards de dollars.

Heureusement le bilan de la production en décembre est finalement satisfaisant, essentiellement du fait des excédents états-uniens de maïs, (+ 4,6% sur l'année antérieure). Cependant les prix restent élevés.

2010 – Le prix des céréales explose à nouveau. La canicule et la sécheresse ont fait s'effondrer les récoltes en Ukraine et en Russie et le 15 août les autorités russes instaure l'embargo sur les exportations. La FAO proteste.

> Les exportations américaines atteignent le prix record de 309 dollars la tonne, soit une augmentation de 70% par rapport à la récolte précédente.

Mais grâce à des pluies abondantes, l'Afrique n'aura pas besoin d'importer ; du coup la hausse des prix se limitera à 8%.

La chrématistique contemporaine vient de s'aviser de ce que la loi de l'offre et de la demande se spécifie, pour une catégorie particulière de marchandises, par un effet particulièrement intéressant : en cas de rareté, le prix tend vers l'infini. C'est l'effet de King et la catégorie de marchandises en question, c'est celle des denrées alimentaires. On a donc déjà commencé à spéculer sur les céréales ; évidemment on finit par buter sur ce qu'on nomme par euphémisme la « demande non solvable » et, le cas échéant, sur l'autre composante de l'effet de King : quand les productions agricoles sont abondantes, leur prix tend vers zéro.

Il y a cependant une forte probabilité pour que les chutes des productions agricoles provoquées par la déstabilisation climatique se traduisent par un renchérissement spéculatif qui les mettra hors d'atteinte des populations les plus pauvres, sauf à espérer que le Programme alimentaire mondial<sup>39</sup> puisse continuer à faire face à une demande sans cesse croissante.

La FAO estime qu'un milliard d'êtres humains souffrent d'une faim chronique et que 24 millions en meurent chaque année.

<sup>39</sup> World Food Program ; organisation issue de l'ONU qui procure de la nourriture à environ 90 millions de personnes chaque année, dont plus de la moitié sont des enfants.

La logique du profit fait peser une autre menace sur la sécurité alimentaire mondiale, celle de la confiscation génétique. Entre les hybrides de première génération non stabilisés, les Variétés à Haut Rendement, dites VHR, et les Organismes Génétiquement Modifiés, dits OGM, la stratégie est toujours la même : faire en sorte que le paysan ou l'agriculteur rachète des semences et des intrants chaque année. Seulement cette politique de développement induit un appauvrissement génétique tel qu'il rendra à l'avenir impossible toute forme d'adaptation rapide à des conditions climatiques nouvelles.

Une exception prometteuse : le NERICA<sup>40</sup>, un riz hybride stabilisé et non stérile, peu exigeant en eau et résistant aux ravageurs, qui pourrait sortir le continent africain de la faim endémique et de la dépendance.

Mais ailleurs, on déchant. Les variétés de riz à haut rendement sont exigeantes en eau et sensibles aux ravageurs ; l'emploi systématique de pesticides empoisonne l'environnement et finit toujours par sélectionner des super ravageurs ; il faut alors changer de cultivar avant que les récoltes ne s'effondrent, ce qui a lieu au bout de 3 à 8 ans, cette rapidité étant due à l'homogénéité génétique des plants. L'IRRI<sup>41</sup> distribue actuellement la souche IR72, autrement dit le 72° cultivar. Comme par ailleurs les zones sauvages où survivaient tant bien que mal les congénères naturelles des plantes cultivées sont en constante régression et que, dans les banques de gènes, les plants, les graines et les tissus des espèces présentant un intérêt économique, ne se conservent qu'une trentaine d'années, on voit arriver le moment où il sera impossible de trouver les ressources génétiques qui permettraient de faire face aux aléas provoqués par les modifications climatiques.

Qu'il s'agisse de stress météorologiques ou de ravageurs, ce sont au contraire les mélanges variétaux qui, dans la plupart des cas, assureraient des récoltes minimales.

Mais la logique économique est tout autre ; c'est aujourd'hui celle des OGM. Quand le génie génétique s'est penché sur l'agriculture, les optimistes ont cru qu'on produirait bientôt des plantes capables de synthétiser leurs propres engrais en utilisant l'azote de l'air et qu'ainsi on pourrait enfin garantir à chaque être humain le droit de manger à sa faim. Et puis les start-up du secteur ont toutes été rachetées par des majors de l'industrie chimique...

Parmi les modifications génétiques implantées sur les semences, si la première permet aux plants d'échapper au ravageur principal, une autre implante la résistance aux herbicides, une troisième inhibe la germination de la descendance ou provoque la stérilité des graines. On aura compris qu'il s'agit de faire en sorte que le paysan,

<sup>40</sup> NEw RIce for afriCA.

<sup>41</sup> Institut International de Recherche sur le Riz (International Rice Research Institut) ; ONG internationale basée dans les Philippines.

convaincu d'abord par la résistance au ravageur principal, passe chaque année à la caisse pour racheter des semences et des intrants.

En Inde l'emploi des OGM, notamment les semences du coton Bt, s'est soldé en quelques années par le suicide de 200 000 paysans surendettés. Vandana Shiva rapporte que le sac de semences de 1 kg est ainsi passé de 5 ou 6 roupies à 3600 roupies ; alors quand on vient saisir sa terre, le paysan avale le bidon de pesticides.. Et elle ajoute « La démocratie de la Terre n'est pas compatible avec les brevets sur les semences ».

Monsanto détient 90% des brevets sur les OGM et se livre partout à un lobbying intense auprès des hommes politiques, des syndicalistes et des diplomates ainsi que l'a révélé Wikileaks ; la firme n'hésite pas à utiliser les menaces contre ceux qui tentent de lutter contre son inconcevable mainmise sur les ressources génétiques et alimentaires mondiales. Par une suite de heureux hasards des ravageurs incontrôlables s'attaquent à des cultures florissantes : la BXW<sup>42</sup> s'en prend à la banane en Afrique, un ver ravage les souches naturelles de la petite courge favorite des Indiens ; évidemment les alternatives génétiquement modifiées sont prêtes à la commercialisation. Mais ce qui est criminel, c'est moins cette rapacité que l'inconscience absolue avec laquelle Monsanto joue ainsi avec la survie de l'humanité.

Il faut en effet savoir que si les cultivars génétiquement modifiés comportent tous une résistance aux insecticides, c'est qu'en dehors du ravageur « ciblé » par l'OGM. et qui a servi à sa promotion commerciale, ils présentent une susceptibilité élevée à tous les autres.

Evidemment, au bout de quelques années, comme dans le cas des VHR, un super ravageur est sélectionné. A cet égard la chrysomèle du maïs, est un cas d'école. Comme elle se développait, en dépit de l'emploi d'insecticides, les agriculteurs américains ont massivement employé du maïs transgénique ciblé *Diabrotica vergifera* (c'est le nom de ce petit coléoptère) à partir de 2003 (45% de la surface cultivée en maïs) ; mais en 2009 une souche de *Diabrotica* mutante est apparue sur une parcelle de maïs transgénique, laquelle s'est avérée résistante à la toxine secrétée par le maïs Monsanto... mais pas à celle du maïs de son concurrent, Mycogen.

Pour le moment on ne peut pas dire s'il s'agit d'augmenter les doses de toxines pour satisfaire le client ou de l'emporter dans la guerre des gènes.

Dernier avatar du génie génétique commercial : en Géorgie en 2009 le gène de résistance aux herbicides implanté sur le soja est passé, sans qu'on sache comment, à l'amarante ; 5000 hectares de cultures ont été abandonnées et 50 000 autres ont vu leur rendement s'effondrer.

Le 2 décembre 2011 l'Assemblée nationale a adopté une loi visant à « simplifier l'utilisation des semences de variétés protégées » ; celle-ci se traduit par l'instauration

<sup>42</sup> Banana Xanthomonas Wilt : en fait Xanthomonas campestris, champignon parasite des crucifères, servant à la synthèse du xanthane, largement utilisé dans les industries alimentaires et cosmétiques.

d'une taxe sur l'utilisation des graines fermières. Les promoteurs de la loi se défendent contre les objections en faisant valoir qu'aujourd'hui la plupart des semences utilisées en agriculture relèvent de la propriété intellectuelle.

En ce cas il faut aussi rétribuer les paysans dont le travail de sélection variétale se poursuit depuis le début du néolithique.

Le protocole de Nagoya est l'aboutissement de la 10<sup>e</sup> conférence sur la diversité biologique qui s'est tenu en octobre 2010 ; il stipule que tous devront avoir accès aux ressources génétiques issues de la biodiversité et que les bénéfices qui seront tirés de ces ressources devront être partagés avec les pays où elles ont été prélevées ; par ailleurs ces prélèvements devront faire l'objet d'une déclaration officielle.

En attendant que Monsanto verse aux hommes politiques du tiers-monde quelques royalties, les abeilles continuent à mourir en masse. Partout dans le monde, les pesticides les ont rendues vulnérables à l'acarien *Varroa destructor* et au champignon *Nosema*. Les insecticides neurotoxiques tuent à très faibles dose : 1 millième de milliardième de gramme tue une abeille en 10 jours, après avoir gravement perturbé son comportement et sa communication avec ses congénères.

Pour comprendre la gravité du problème il faut savoir qu'*Apis mellifera*, notre abeille familière, n'est qu'une espèce parmi 20 000 autres et que les abeilles en général assurent la pollinisation de 80 % des végétaux.

Mais les OGM vont sauver le monde... enfin, le monde solvable.

## C Esquisse d'une réflexion philosophique

*On a vraiment besoin de penseurs en philosophie, en sciences politiques, en sciences de l'homme, pour un nouveau projet de société.*

Valérie Vincent-Delmotte, paléoclimatologue.



Asperatus over Sakiabellien, Dathchies, Scotland © Van Drice

## I De la théorie

Un nouveau nuage, baptisé *Asperatus Undulatus*, est en cours d'homologation (**Doc 22**). Quoique l'Organisation Météorologique Mondiale hésite à modifier son atlas des nuages, il faut se rendre à l'évidence : des formes et des localisations nouvelles apparaissent (*Mammatus*, nuages noctulescents<sup>43</sup> aux latitudes moyennes). Cette réticence est significative de notre difficulté à comprendre ce qui est en jeu dans notre représentation du monde. Quel statut assigner à ces nuages, en effet ? Formes nouvellement découvertes dont il s'agit d'élaborer le concept (pour ne pas dire l'εἶδος) ou bien apparition de formes nouvelles induites ou rendues visibles par les modifications que nous faisons subir à ce que nous nommons encore notre environnement ?

Notre représentation du réel est globalement inadéquate et elle fait désormais obstacle à une nécessaire prise de conscience.

Il nous faudrait commencer par apprendre à penser le réel dans sa complexité et sa continuité c'est-à-dire renoncer à notre tropisme à la fois causaliste, analytique et substantialiste.

Ce qui survient est émergence, c'est-à-dire résultante aléatoire d'un faisceau de facteurs variables, aux effets non linéaires, jamais entièrement déductible des conditions précédentes.

Il n'y a de causalité simple que dans les manuels de physique et les lois qu'on y énonce sont des approximations analytiques du réel :

- - l'eau gèle à 0°C... à condition d'être pure
- - l'oscillation du pendule est l'effet de la pesanteur à condition qu'on néglige les frictions et que sa masse soit suffisamment faible pour qu'on puisse le tenir pour un « point matériel » ; autrement c'est un « pendule pesant ».
- -  $V = \frac{1}{2} gt^2$  mais dans le vide seulement.
- - l'eau s'évapore à 100° C mais l'évaporation commence bien avant que cette température soit atteinte et la probabilité de trouver une molécule de glace dans un nuage de vapeur est non nulle.

Les lois sont statistiques ; elles énoncent des probabilités.

Et les théories physiques ne sont pas séparables de leur domaine de validité.

Ainsi la dynamique classique s'applique-t-elle à condition que :

- - l'objet en mouvement soit incomparablement plus grand qu'un atome

<sup>43</sup> Littéralement, « brillants la nuit » ; nuages de très haute altitude, apparaissant à la fin du crépuscule et éclairés par les rayons tangents du soleil par dessous. Habituellement présent aux hautes latitudes.

- - que sa masse reste malgré tout modérée
- - que sa vitesse soit nettement inférieure à celle de la lumière
- - qu'il ne comporte pas de charge électromagnétique.

Comment déterminer ce qui l'emporte entre le principe d'Archimède et la tension superficielle ? Il faut en référer à la « science des surfaces », id est à la spécialité qui s'occupe des phénomènes survenant à l'interface de deux phases.

C'est pourquoi les mailles des modèles climatiques ne seront jamais assez fines ; pour bien faire, il faudrait pouvoir y inclure chaque atome. Ainsi les experts du GIEC rêvent-ils d'une sorte de démon de Laplace tout en sachant que, même s'il n'était pas hors d'atteinte, il ne donnerait jamais que des probabilités.

C'est parce que le monde est une entité essentiellement complexe et chaotique qu'il fait émerger des formes nouvelles ; mais rien ne garantit la régularité de la conjonction des facteurs qui les a rendu possibles. La condition de leur surgissement est aussi celle de leur disparition. Toutes choses fuient.

C'est à la condition de le comprendre que nous pouvons espérer nous maintenir dans le monde.

Comment comprendre ?

Il faut, certes, analyser, distinguer, isoler ; c'est ce que font nos lois scientifiques. Mais il faut aussi faire des synthèses, et de plus en plus vastes, sortir de la « pensée en miettes », selon l'expression d'Edgar Morin. Ces lois sont au fond comme des lettres et, comme telles, elles nous sont indispensables ; mais il nous reste à apprendre à lire.

C'est ce qu'exprime magistralement Ilya Prigogine :  
 « Nous assistons à l'émergence d'une science qui n'est plus limitée à des situations simplifiées, idéalisées, mais nous met en face de la complexité du monde réel, une science qui permet à la créativité humaine de se vivre comme l'expression singulière d'un trait fondamental commun à tous les niveaux de la nature. »<sup>44</sup>

Ce surgissement appelle de notre part une nouvelle révolution copernicienne ; cependant l'obstacle, ici, est d'un autre ordre. Etienne Klein dit justement « Nous développons des mécanismes par lesquels nous arrivons à ne pas croire ce que nous savons ».

Cette figure, c'est celle du déni.

Au fond, nous interdisons à nos connaissances nouvelles de modifier notre système de représentations, peut-être parce qu'il est mixte et qu'il fait coexister des séquences

<sup>44</sup> « La fin des certitudes » 1996

rationnelles limitées et des fables à l'usage des enfants. A celles-là , transmises autrefois par les adultes tutélaires, nous ne voulons pas renoncer.

Mais dans cette inconscience et cette inconséquence nous exposons déjà les plus vulnérables. Car il n'y a pas, en ces matières, d'évidence du mal ; c'est pourquoi le devoir préalable est un devoir d'intelligence.

## II Et de la pratique

A l' échelle du monde et de sa complexité, nous nous sommes conduits comme des chasseurs cueilleurs, sans souci de la pérennité des ressources ou, plutôt, confiants dans la capacité de ce que nous nommons « la nature » à les renouveler toujours.

Inconscience ou ignominie ?

D'où vient que les Etats-Unis aient refusé de ratifier le protocole de Kyoto et, dans le même temps, commandé à la CIA une étude sur les effets de la déstabilisation climatique ?

Notre système économique produit partout des surnuméraires<sup>45</sup> :

- - à l'échelle de la nation, ceux qui ne sont plus nécessaires, ni au processus de production, ni à celui de la consommation, même contrainte au moyen du crédit.
- On peut saluer la constitution rapide des classes moyennes chinoises ; reste à se demander si le prix à payer était inévitablement la misère de ces populations que l'exil rural entasse dans les bidonvilles.
- - à l'échelle du monde, les foules affamées, incapables d'exploiter adéquatement leurs ressources et dont on se passerait bien.

Le déni, sans doute, est le moyen de ne pas apercevoir cette horreur rampante que nous continuons imperturbablement d'alimenter.

Dans « Le principe responsabilité » Hans Jonas reformule l'impératif catégorique à la mesure des risques qui pèsent sur l'avenir de l'humanité :

« Agis de telle manière que ton action soit compatible avec le maintien d'une vie authentiquement humaine sur Terre. »

Mais nous n'avons pas besoin d'une nouvelle morale : nous avons déjà commencé à ruiner des vies, à confisquer celles de nos enfants.

Il y a 20 ans, non sans raison, René Dumont demandait qu'on remplaçât « générations futures » par « générations suivantes ».

L'inhumain fait déjà partout son œuvre qui est aussi notre œuvre ; simplement, répétons-le, il n'y a pas ici d'évidence du mal.

<sup>45</sup> Concept de Robert Castel in « Les métamorphoses de la question sociale : une chronique du salariat » 1999

L'autre aspect du problème pratique, c'est le politique.

Les pays qui détiennent à la fois le pouvoir économique et le pouvoir politique sont des démocraties. En démocratie l'homme politique, pris entre les certitudes des économistes et les principes déontologiques des scientifiques, entre les exigences de son électorat et ce que la raison commande, prend presque toujours des décisions à court terme qui remettent à plus tard la solution des problèmes.

Il s'ensuit qu'une action politique responsable, en l'occurrence qui répondrait de l'avenir, ne peut en appeler qu'à la moralité.

Car pour une fois, il ne s'agit pas d'obtenir mais de renoncer.

A quoi ? A notre voracité énergétique, à notre consommation à outrance, à notre « niveau de vie ».

Et c'est ici précisément que la réflexion philosophique est requise, en ceci qu'elle est essentiellement libre et qu'il s'agit d'inventer.

Quoi donc ?

- - Une nouvelle façon de vivre ; parce qu'on ne peut espérer de renoncement volontaire sans proposer une alternative, le remplacement du développement économique par le développement humain.
- - De nouvelles solidarités ; parce qu'une décroissance incontrôlée peut provoquer aussi beaucoup de misères.
- - Une nouvelle éducation ; parce qu'à côté du contrat social, il faut faire place au « contrat naturel » et à tout ce qu'il implique, notamment dans l'ordre de l'indispensable stabilisation démographique.

Utopie ? Pas tant que ça ; après tout, il ne s'agit jamais que des Droits de l'Homme.