

cycles et effets « retard »

l'exemple des océans

par jacques merle

Les phénomènes naturels possèdent des composantes cycliques. On connaît maintenant assez bien un cycle climatique long – de période voisine de 100 000 ans – faisant alterner des périodes glaciaires et des périodes interglaciaires chaudes comme celle que nous vivons actuellement. Ce cycle de 100 000 ans est forcé par des variations à long terme des paramètres orbitaux de la terre par rapport au soleil. D'autres cycles à plus haute fréquence existent. Le plus commun, le plus naturel, pourrait-on dire, est le cycle annuel qui fait alterner les saisons et rythme la vie végétale et animale. Mais quels sont les phénomènes physiques qui sous-tendent ces variations cycliques et existe-il des phénomènes cumulatifs avec des effets retard possibles ?

deux classes de phénomènes

Ces phénomènes cycliques sont le résultat de deux classes distinctes de phénomènes qui modifient notre environnement physique.

Il existe des changements extérieurs s'appliquant à notre système planétaire qui le contraignent à évoluer. En anglais, on parle de « forcings ». Par exemple, le changement des paramètres orbitaux de la terre dans sa rotation autour du soleil, précédemment mentionné, a pour effet de faire varier la répartition saisonnière de l'énergie solaire reçue par la terre en un lieu donné. Par un effet d'enchaînement complexe d'actions et de rétroactions cumulatives (feedback en anglais) qu'il implique sur les éléments constitutifs de notre environnement planétaire tels que l'atmosphère, l'hydrosphère (océan), la cryosphère, la lithosphère, la biosphère, ces contraintes externes (à la fréquence approximative de 100 000 ans) ont pour effet de générer une alternance de climats glaciaires froids et interglaciaires chauds. Dans un tel système physique forcé, on observe en général une réponse à la fréquence où il a été forcé (c'est le cas notamment de la réponse climatique saisonnière en réponse au « forcing » solaire saisonnier) mais on peut obtenir des réponses à d'autres fréquences plus basses ou au contraire plus élevées correspondant à des sous-multiples de cette fréquence principale.

La notion de « forcing » est relative à un système clos que nous avons défini précédemment pour notre planète comme étant composé de l'ensemble atmosphère - hydrosphère (océan) - cryosphère - lithosphère et biosphère. Mais ce système peut continuer longtemps à varier après que les « forcings » exté-



11 MARS 1996

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 43856

Cote : B ex 1

CYCLES ET EFFETS RETARD

rieurs précédemment décrits ont cessé, et la disparité des éléments constitutifs de ce système, ainsi que leurs différents temps de réponse, peuvent conduire à considérer qu'un état d'équilibre statistique moyen ne sera jamais atteint.

On voit apparaître ainsi ici la deuxième classe de phénomène susceptibles de générer une variabilité du climat et de l'environnement : c'est l'autovariation des éléments constitutifs du système planétaire atmosphère, hydrosphère (océan), etc... Quelques approfondissements sont nécessaires. C'est Edward Lorenz, météorologue et mathématicien américain, principalement connu pour avoir introduit la notion de chaos en météorologie et trouvé un champ d'application physique à la théorie mathématique dite des « attracteurs étranges » qui, le premier, a développé le concept de l'intransitivité du climat. Lorenz posa en 1968 une question fondamentale : le climat est-il stable ? En d'autres termes, en l'absence de tout « forcing » extérieur, le système atmosphère-océan-cryosphère-lithosphère-biosphère, après un temps plus ou moins long et même infini, tend-il vers un état statistique stable ? Et cet état stable est-il unique ?

Par analogie avec les séries temporelles aléatoires dites transitives si leurs statistiques sont stables et indépendantes des conditions initiales, dites intransitives si elles ne le sont pas, Lorenz envisage des états climatiques transitifs et intransitifs. Simulant des systèmes non linéaires beaucoup plus simples que ceux reliant l'atmosphère à l'océan, par exemple, il trouve que ces systèmes peuvent avoir tendance à fluctuer de façon irrégulière autour de deux ou plusieurs états d'équilibre possibles. Ces états stables limites sont aujourd'hui appelés des attracteurs. Une totale intransitivité est cependant difficilement acceptable physiquement. Plus réaliste semble être la notion de quasi intransitivité. Dans cette hypothèse, le système climatique évoluerait entre des états stables différents, se maintiendrait pendant une certaine période dans l'un des états possibles, puis passerait brutalement à un autre état, etc...

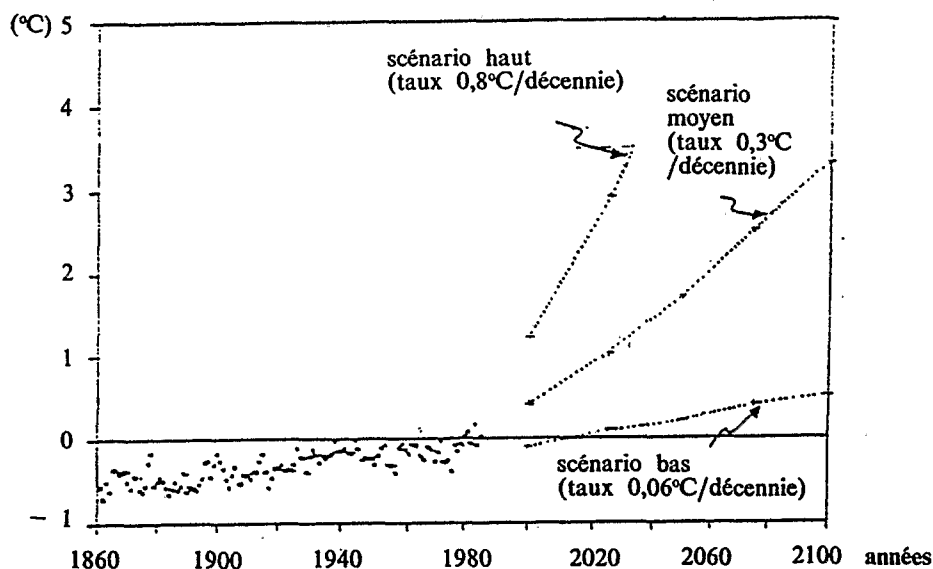
L'hypothèse suivant laquelle la variabilité climatique à courte période, de quelques mois à quelques décennies, est avant tout due à l'autovariation du système couplé océan-atmosphère-cryosphère est généralement bien admise. A des échelles plus longues de l'ordre du siècle et du millénaire, on peut également prendre en compte les deux éléments restants du système planétaire : la lithosphère dont la géométrie peut changer (éruption volcanique, érosion, mouvements isostatiques etc...) et la biosphère.

La biosphère mérite ici un développement particulier. Jusqu'à l'époque industrielle, les espèces végétales et animales, dont l'homme, s'intégraient dans les cycles naturels sans qu'une action endogène spécifique de la biosphère sur les autres milieux, puisse être considérée comme significative. La biosphère subissait le stress environnemental et s'adaptait avec une constante de temps, quelquefois assez longue, de l'ordre du millénaire, mais cependant sans rétroaction déterminante sur l'issue de l'évolution du système planétaire (état chaud - état froid). Il en est différemment aujourd'hui : la biosphère, du fait de l'homme, qui agit sur le reste de l'environnement et qui en constitue actuellement l'élément le plus explosif et peut-être le plus imprévisible, doit être considérée comme un élément interne déterminant de l'évolution du climat et de l'environnement à toutes les échelles de temps.

Ainsi l'autovariation interne du système planétaire dont l'homme est partie intégrante, constitue la source de variabilité principale du climat et de l'environnement indépendamment des sources de variabilité externes d'origine astronomique et cosmique. Ce constat masque cependant notre profonde ignorance de l'évolution probable du système aux différentes échelles de temps. Le problème est d'une très grande complexité. On ignore presque tout de l'évolution spécifique possible de chacun des milieux, de leur constante de temps propres, des seuils critiques, s'ils existent, au-delà desquels on peut changer de régime et où un système action-rétroaction peut se mettre en route dans un sens ou dans l'autre (feed-back positifs ou négatifs). Seuls quelques scénarii-types sont envisagés actuellement avec des modèles simplifiés, en prenant un élément du système et en faisant évoluer un de ses paramètres physiques d'une certaine quantité donnée. A titre d'exemple, le graphique ci-joint (fig. 1) montre 3 scénarii issus de 3 modèles différents présentant l'évolution de la température moyenne de la planète et du niveau moyen des océans si le taux de gaz carbonique actuellement déversé dans l'atmosphère est maintenu. On peut voir sur ce cas concret et relativement simple qu'en raison de notre ignorance, l'incertitude sur l'évolution de notre environnement reste énorme.

un exemple d'effet retard : le réchauffement (ou refroidissement) de l'océan et ses conséquences

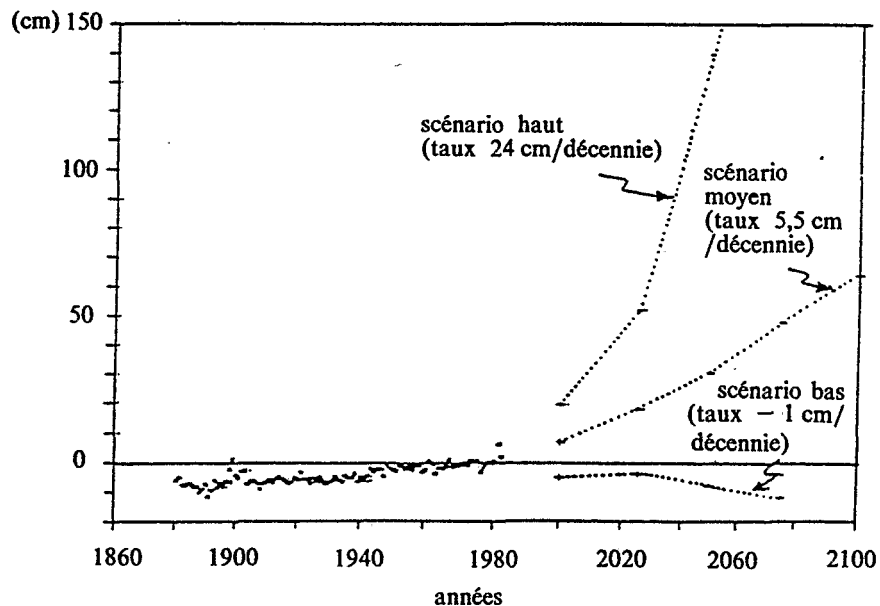
Des 5 milieux essentiels qui constituent notre système planétaire déjà cités, on commence à connaître l'interaction des deux principaux : l'atmosphère et



EVOLUTION DE LA TEMPERATURE MOYENNE DE LA PLANETE

Fig. 1.a. Changement de la température moyenne de la terre prévue par 3 scénarii différents en réponse à une émission de gaz carbonique constante et égale à celle observée en 1987.

CYCLES ET EFFETS RETARD



EVOLUTION DU NIVEAU MOYEN DES OCEANS

Fig. 1.b Changement du niveau moyen des océans (en centimètres) pour les mêmes conditions. (extrait du rapport n° 225 du programme mondial de recherche sur le climat : « Developing policies for responding to climatic change » - avril 1988 - WMO. Genève).

(1) La lithosphère et la biosphère ne stockent pas et ne transportent pas d'énergie en grande quantité à la surface de la planète mais elles réagissent localement dans l'atmosphère : évapo-transpiration pour le milieu végétal, émission et absorption de gaz carbonique pour l'ensemble de la biosphère (y compris pour l'activité humaine). La cryosphère par contre possède des capacités de stockage thermique non négligeables. La couverture de neige et de glace recouvrant les terres et les océans subit des variations saisonnières importantes liées aux évolutions de la température atmosphérique moyenne ; en retour, ces variations d'étendue, par feed-back positif, font varier la quantité d'énergie réémise vers l'espace et joue un rôle important dans l'équilibre climatique. L'évolution de la cryosphère est également en relation étroite avec le niveau de l'océan.

l'océan. Les interactions entre l'océan et l'atmosphère expliqueraient l'essentiel de la variabilité de notre environnement climatique dans la gamme de temps qui va de quelques mois à quelques siècles, voire au millénaire. En effet, si l'on néglige provisoirement la lithosphère, la cryosphère et la biosphère (1), l'atmosphère et l'océan sont les deux milieux qui rééquilibrent thermiquement la planète en transportant, à parts égales, la chaleur reçue en excès aux latitudes tropicales vers les moyennes et hautes latitudes où cette chaleur est restituée à l'espace.

L'atmosphère est la composante la plus variable du système. Elle a un temps d'ajustement thermique relativement court, de l'ordre de trois semaines à un mois, ce qui permet de dire qu'elle ne conserve la « mémoire » d'une perturbation thermique ou dynamique que pendant un mois au maximum. Bien qu'elle occupe un volume important, sa capacité de stockage énergétique, principalement thermique, n'est pas très grande, elle opère cependant des transports énergétiques horizontaux et verticaux importants à grande vitesse (vent).

L'océan constitue un énorme réservoir d'énergie thermique à cause de sa masse importante et de la valeur élevée de la chaleur spécifique de l'eau. On estime que la capacité calorifique de l'océan est 1 200 fois plus élevée que celle de l'ensemble de l'atmosphère. Les courants océaniques peuvent transporter cette énergie depuis les régions équatoriales où elle est reçue en excès, vers les régions tempérées et polaires où elle est restituée à l'atmosphère. Ces transports océaniques s'effectuent à des échelles de temps de l'ordre du mois

à l'année pour les courants superficiels mais peuvent atteindre des constantes de temps de plusieurs siècles pour les courants profonds. C'est ce qui fait dire que l'océan a une « mémoire longue » des perturbations énergétiques affectant le système climatique et justifie son rôle primordial dans l'évolution du climat.

A l'interface du système couplé océan-atmosphère, l'énergie s'échange sous plusieurs formes (chaleur, notamment, masse) à diverses échelles et selon un enchaînement complexe de phénomènes physiques.

Deux types d'effets retard ont été observés pour l'océan. Le premier affecte la couche superficielle chaude des régions tropicales du Pacifique à une échelle de temps courte, s'étendant sur une période de deux à quatre ans. Le phénomène est connu sous le nom d'El Nino et d'Oscillation Australe. Le deuxième affecte les couches profondes (de 1 000 à 5 000 mètres de profondeur) de la circulation méridienne planétaire qui redistribuent l'énergie thermique reçue en excès dans les régions équatoriales vers les régions polaires. Sa constante de temps théorique est beaucoup plus longue, de l'ordre du millénaire.

En ce qui concerne El Nino et l'Oscillation Australe, ce phénomène est le résultat d'une instabilité spontanée (ou forcée) entre l'atmosphère et l'océan tropical. Le météorologue allemand J. Bjerknes fut le premier à associer le réchauffement océanique près des côtes du Pérou à une vaste oscillation du système océan-atmosphère, affectant l'ensemble de la région indo-pacifique. Il montra qu'il existait une corrélation négative entre la pression atmosphérique superficielle de la région située au nord de l'Australie et de l'Indonésie, et la pression atmosphérique de la région située aux environs de l'île de Pâques et de Tahiti. C'est l'Oscillation Australe. Lorsque la pression atmosphérique est plus basse que la moyenne pendant plusieurs mois sur la région Australie-Indonésie, elle est, au contraire, plus élevée que la moyenne à 10 000 kms de là, dans l'océan Pacifique central (vers l'île de Pâques et Tahiti). Ces oscillations de la pression atmosphérique sont aussi corrélées aux variations de la température de surface de l'océan dans la région située au large des côtes du Pérou et de l'Equateur, siège d'El Nino. Lorsque l'index de l'Oscillation Australe, qui se définit par la différence de pression au niveau de la mer entre Darwin (nord de l'Australie) et l'île de Pâques, est à son minimum, l'anomalie thermique chaude caractéristique d'« El Nino » apparaît au large du Pérou et de l'Equateur.

Depuis le début des années 1950, on dispose de moyens d'observation suffisants, qui ont permis d'étudier 12 phénomènes El Nino associés à l'Oscillation Australe. L'avant-dernier en date est apparu au cours de l'été de 1982 et s'est développé tout au long de l'année 1983 avec une intensité jamais observée jusqu'alors. Son impact climatologique a été considérable et a attiré l'attention des médias pendant plusieurs mois. Ces 12 derniers El Nino et les événements climatologiques qui leur sont associés, ne se sont pas tous déroulés suivant les mêmes schémas et il est impossible, à l'heure actuelle, d'affirmer que ces oscillations météo-océaniques sont l'effet de l'autovariation naturelle des 2 milieux ou, au contraire, soit le résultat des à-coups du système interactif en réponse à des chocs naturels (éruptions volcaniques) ou artificiels. Indépendamment de ses causes profondes, ce phénomène montre qu'une perturbation ou oscillation naturelle peut se développer sur un cycle de plusieurs années en affectant, de façon spectaculaire, les conditions climatiques de ré-

CYCLES ET EFFETS RETARD

gions aussi vastes que l'océan Pacifique sud, l'Australie, l'Indonésie, le Pérou et les côtes d'Amérique du Sud et du Nord, créant des sécheresses prolongées ou au contraire des inondations catastrophiques. Ce phénomène est l'illustration la plus précise et la mieux étudiée actuellement que nous ayons d'un effet retard de courte période s'établissant entre l'océan et l'atmosphère.

En ce qui concerne le transport méridien de chaleur opéré par les couches profondes des océans, un effet retard de plusieurs siècles est attendu, compte-tenu du temps de parcours théorique d'une particule d'eau qui, plongeant aux hautes latitudes, réapparaîtrait à la surface des régions tropicales pour acquérir de la chaleur et cheminerait de nouveau en profondeur vers les pôles pour délivrer de nouveau cette chaleur à l'atmosphère. Ce transport de chaleur méridien à l'échelle mondiale a été estimé dans l'Atlantique de l'ordre de 1 Peta Watt à 10^{15} Watt. Un effet retard induit par cette circulation océanique profonde et consécutif au réchauffement récent du climat global de la planète ($1/2^\circ$ degré C depuis le début du siècle) a été mis en évidence par deux campagnes océanographiques effectuées au même endroit à 30 ans d'écart. Entre 1950 et 1980, on a noté des différences significatives de température de l'ordre du dixième de degré C dans les eaux profondes de 2 à 4 000 mètres de l'Atlantique Nord, ce qui conduit à un changement important du transport de chaleur associé. C'est la première fois qu'à été mis en évidence un changement global de la circulation océanique qui semble en relation avec le changement de température de la planète, certes modeste ($1/2^\circ$ C), observé depuis le début du siècle. Il est trop tôt pour établir de façon définitive une relation directe de cause à effet entre ces deux faits mais l'observation de la circulation océanique actuelle montre qu'elle n'est pas permanente et qu'elle peut évoluer lentement mais durablement dans l'ensemble de sa masse confortant ainsi l'hypothèse que cette circulation est en relation étroite avec le climat actuel. Les observations paléocéanographiques montrent que la circulation océanique des périodes glaciaires était très différentes et également en relation étroite avec le climat de cette époque. On ne sait qui, de l'air ou de l'eau, détient la clé du changement et précède l'autre mais ce que l'on sait, c'est que, par sa grande inertie thermique, l'océan peut mémoriser des anomalies. Toutes les perturbations climatiques même de faible amplitude comme le réchauffement que nous observons en ce moment et que certains pensent être dû à l'effet de serre causé par l'accroissement de gaz carbonique dans l'atmosphère, se marquent et s'additionnent dans l'océan à l'échelle de plusieurs siècles au moins.

Ceci n'est qu'un exemple d'un effet retard possible et accessible à nos moyens d'observations actuels. Il fait l'objet d'un grand programme international : WOCE qui mobilisera à partir de 1991, pour la première fois, une fraction importante des forces de recherche océanographique du monde, en associant des observations par navires de recherche, des satellites et des modèles numériques développés sur les plus puissants calculateurs existants actuellement. Nous pourrions peut-être alors comprendre et simuler plus précisément le rôle de l'océan dans l'établissement et l'évolution du climat.

jacques merle
15 mai 1989

Jacques Merle, directeur de recherche à l'ORSTOM. Océanographe Physicien.