

et montra que ce système très simplifié était déjà imprévisible. Cette étude choquante eut des applications dans beaucoup d'autres domaines : l'idée des systèmes chaotiques était lancée.

## LES PÉRIODICITÉS CLIMATIQUES

Heureusement pour notre compréhension, l'atmosphère après dix jours a un comportement macroscopiquement prévisible : les saisons et les zones climatiques témoignent de phénomènes régulateurs de la circulation atmosphérique.

Depuis les débuts de la marine à voile, les navigateurs ont recueilli des données sur la circulation atmosphérique. Halley, au XVII<sup>e</sup> siècle, a étudié les premiers relevés des marins et observé les régularités de la circulation atmosphérique avec les vents d'Est, type alizé près de l'équateur, les vents d'Ouest à nos latitudes ; superposée à ces mouvements, une autre circulation brasse l'air, qui monte près de l'équateur (zone du pot au noir) dans les zones de vent d'Est, et qui redescend au Nord et au Sud vers 30 degrés Nord, 30 degrés Sud et marque les zones désertiques. Les limites de ces grandes cellules tropicales sont déterminées par la vitesse de rotation de la Terre qui les

empêche de se développer plus au Nord (comme elles le font par exemple sur la planète Mars). Ces circulations en cellules fixent le climat des tropiques avec une zone pluvieuse près de l'équateur et une zone sèche un peu au-delà de l'équateur.

La circulation dans ces cellules fluctue à des échelles de temps longues. Dans le Pacifique, les zones d'ascendance et de descendance de l'air se déplacent : elles suivent des variations de température de l'océan de période trois à quatre ans, le cycle de El Niño observé par les pêcheurs péruviens. Ces pêcheurs avaient remarqué que des eaux chaudes chargées de poissons revenaient à intervalles réguliers le long des côtes du Pérou. Ils appelaient cette arrivée El Niño, du nom de l'enfant Jésus, parce qu'elle coïncidait avec Noël. À ces échelles de temps, de l'ordre de quelques années, la structure de la circulation atmosphérique est lentement modifiée par l'interaction avec l'océan : on voit se dessiner les premières échelles temporelles de la climatologie.

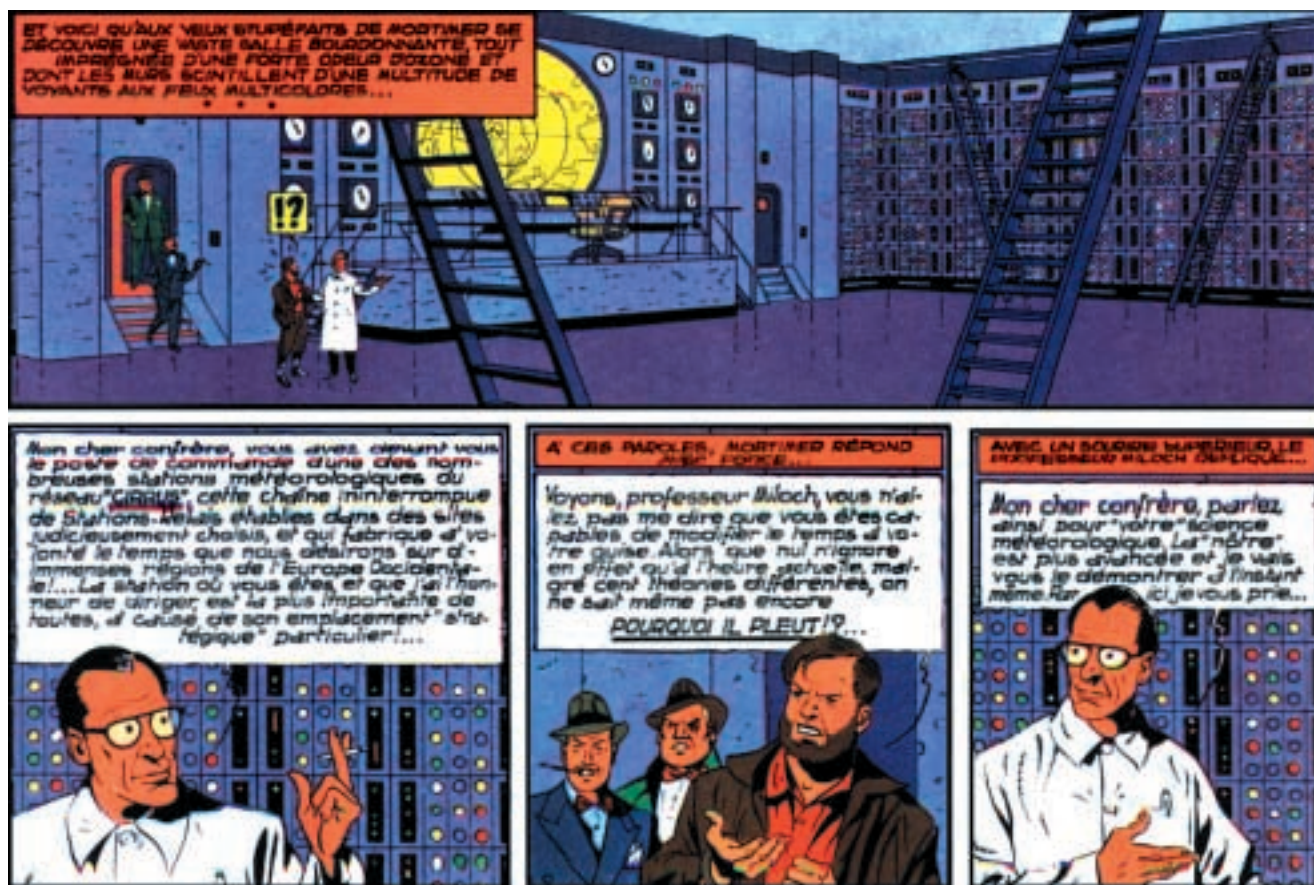
Les mouvements de l'atmosphère résultent de la convection et de la rotation de la Terre. Le rayonnement solaire, qui traverse l'atmosphère, est absorbé en partie par le sol ; l'air, chauffé par le bas, se dilate et monte, mais à la diffé-

rence de ce qui se passe dans une casserole, ces mouvements ascendants et descendants sont compliqués par la rotation de la Terre. La zone des déserts est déterminée par la vitesse de rotation de la planète, et même, lors des glaciations du passé, les zones désertiques ne se sont pas beaucoup déplacées. Il serait impossible de modifier les zones climatiques qui résultent de ces mouvements.

## LA MESURE DU CLIMAT PASSÉ

On étudie les transformations du système climatique au cours du dernier million d'années par des carottages dans les glaces polaires ou dans les sédiments océaniques : le climat a évolué avec des périodicités de l'ordre de 100 000 ans, auxquelles se superposent des périodicités un petit peu plus petites, de l'ordre de 40 000 ans et de 20 000 ans. Ces variations résultent de la course de la Terre sur son orbite. Au siècle dernier, un astronome serbe, Milankowitch avait prévu ces variations cycliques.

Les variations à 20 000 ans, les plus courtes, sont dues à la précession des équinoxes. La planète décrit une ellipse autour du Soleil, et la position de l'axe de rotation de la Terre, qui pointe alter-



Un impossible de la météorologie est présenté par Edgar P. Jacobs dans *S.O.S. Météores*.

nativement vers le Soleil et dans la direction opposée au Soleil, définit quatre points qui sont les deux solstices et les deux équinoxes. Actuellement, au moment du solstice d'hiver, on est au plus près du Soleil ; il y a 10 000 ans, au moment du solstice d'hiver, on était au plus loin du Soleil. Le système saisonnier était amplifié par rapport à ce qu'il est aujourd'hui, et ce phénomène de précession des équinoxes a joué un rôle très important dans les transitions climatiques, par exemple sur toute la zone mésopotamienne, sur toute la zone du Sahara fertile. Cette variation quasi périodique de l'axe de rotation de la Terre est pilotée par l'influence des grosses planètes sur la trajectoire de la Terre autour du Soleil.

On connaît aussi très bien l'évolution du dioxyde de carbone ou du méthane au cours des derniers 200 000 ans grâce aux carottes prélevées dans les zones polaires et dans les sédiments océaniques. La teneur en isotopes des glaces permet de retracer les températures passées, et les traces de gaz, le contenu de l'atmosphère. Dans les sédiments océaniques, les fossiles de petits animaux qui vivent dans des eaux de températures variées dénotent les températures prévalant à l'époque ; certains de ces animaux vivant plutôt en surface ou plutôt au fond, on reconstitue les températures de l'océan à différents niveaux. Un marqueur de la température extrêmement puissant est le contenu en oxygène 18 des minuscules coquilles des foraminifères.

### TERRE GELÉE ET SOLEIL JEUNE

Si, aux échelles de temps beaucoup plus longues, dépassant le million d'années, les indices de variations du système climatique sont plus rares, ils indiquent tous une grande stabilité. Cette fixité ne va pas de soi, car le climat actuel de la Terre n'est pas la solution unique d'un climat terrestre dont l'essentiel de l'apport énergétique vient du Soleil. Il y a 30 ans, on s'est aperçu qu'il existe un autre état très stable du système climatique, où toute la planète est recouverte de glace : dans ces conditions, la planète réfléchit presque intégralement le rayonnement solaire et ne se réchauffe pas. Cet état stable de la planète n'a jamais existé et il semble peu probable que le système Terre puisse bifurquer vers cette autre solution possible.

Le paradoxe du Soleil jeune est connexe : il y a trois milliards d'années le Soleil nous envoyait moins d'énergie qu'aujourd'hui. La Terre aurait dû être alors un astre mort et glacé ; or on ne

trouve pas de trace de cet état. C'est qu'il n'a jamais existé : la composition chimique de l'atmosphère de la planète de l'époque était telle que le pâle rayonnement émis par le Soleil était mieux absorbé.

Notre planète est une exception dans le Système solaire : son atmosphère contient très peu de dioxyde de carbone et beaucoup d'oxygène, au contraire de Vénus et de Mars, où le dioxyde de carbone est prépondérant ; c'est la vie qui a diminué, sur Terre, le stock de dioxyde de carbone. Le dioxyde de carbone primitif aurait empêché, il y a trois milliards d'années, que la planète ne se dirige vers un état glaciaire permanent et stable.

### LA PÉRIODICITÉ DES EXTINCTIONS

Une difficulté subsiste : comment expliquer les extinctions qui ont frappé périodiquement la faune et la flore, très approximativement tous les quelque 100 millions d'années ? On ne connaît pas de processus climatiques périodiques qui se répèteraient à ces échelles de temps et qui expliqueraient les extinctions. À l'échelle des dizaines ou des centaines de millions d'années, la dérive des continents domine l'évolution du système climatique.

Le système climatique qui règne depuis deux millions d'années, avec ces fluctuations entre âges glaciaires et âges interglaciaires, est associé à la répartition actuelle des continents, en particulier le continent antarctique qui est bien posé sur le pôle Sud. C'est à partir du moment où le continent antarctique s'est fixé que le climat est devenu moins chaud avec ses oscillations glaciaires-interglaciaires. L'évolution à plus long terme du climat semble dictée par l'évolution de la répartition des océans et des continents, évolution qui n'est pas un phénomène périodique.

Les grandes extinctions sont dues à des phénomènes climatiques puisqu'elles sont réparties uniformément sur le Globe terrestre. On les explique par un événement catastrophique, soit un météorite, soit un volcanisme intense. Pour l'instant ce type d'explication n'éclaire pas leur récurrence.

---

**Hervé LE TREUT est directeur de recherche au CNRS et enseigne à l'École polytechnique. Une retranscription de ce débat, enregistré avec Émile Noël, sera diffusée sur France Culture le 10 janvier 1996, à 9 heures.**

---