

L'océan gouverne-t-il le climat ? par Jacques Merle

sur cette page : | [sommaire](#) | [préface de Jean Labrousse](#) | [préambule](#) |

Sommaire

Préface de Jean Labrousse

Préambule : - La variabilité de l'océan et du climat était encore ignorée au XXe siècle - Des historiens découvrent la variabilité du climat - Le climat dans l'environnement planétaire - Climat, météorologie et océanographie - L'océanographie sort de son moyen âge - Les dimensions nouvelles de l'océanographie - L'objet de cet ouvrage

PERSPECTIVE HISTORIQUE

La découverte - Les Portugais inventent l'océanographie au XVe siècle - Les premiers ouvrages d'océanographie aux XVIe et XVIIe siècles - Le temps des grandes circumnavigations au XVIIIe siècle

Les grandes expéditions scientifiques du XIXe siècle - À la découverte des abysses - L'océan peut-il varier dans le temps ? - Des précurseurs de l'océanographie moderne - Les grandes campagnes océanographiques pluridisciplinaires

L'océanographie se rapproche de la météorologie et devient une géophysique - Les océanographes s'organisent - Les météorologues et les océanographes s'unissent dans l'étude du climat

- Encart : Les principales organisations océanographiques intergouvernementales

LA DYNAMIQUE DE L'OCÉAN

L'océan fluide géophysique stratifié en mouvement

Les moteurs et les conditions aux limites de la circulation océanique - Le forçage radiatif solaire - Le forçage gravitationnel - Les conditions aux limites du système océan-atmosphère

Les équations hydrodynamiques

Les forces en jeu dans la dynamique de l'océan - Les forces à l'intérieur du fluide, pression - friction - Les forces extérieures qui s'appliquent sur l'océan - La force de « Coriolis »

Les principaux courants et leurs théories - Les courants engendrés par le vent, la théorie d'Ekman - Les courants engendrés par les forces de pression - La théorie géostrophique - Les courants d'inertie - Les courants de marée

Les ondes océaniques

- Encarts : - champs de pression, force de Coriolis, vents et courants géostrophiques - les ondes océaniques

LES FONCTIONS DE L'OCÉAN DANS LE CLIMAT

Le climat et sa variabilité - Les forçages climatiques externes - L'auto-variation du système climatique planétaire

Le rôle de l'océan dans le climat et sa variabilité - Le stockage énergétique de l'océan - L'échange énergétique entre l'océan et

l'atmosphère - Le transport énergétique (thermique) de l'océan

LE RÔLE DE L'OCÉAN DANS L'ÉQUILIBRE ÉNERGÉTIQUE PLANÉTAIRE

Les premières estimations du transport thermique méridien - Les intuitions des précurseurs - La question enfin bien posée

La résurrection des « données historiques » - L'atmosphère et l'océan transportent à part égale l'énergie thermique - Comment s'opère le transport thermique méridien océanique ? - L'importance des tropiques

L'équilibre énergétique planétaire revisité par les grands programmes - La circulation générale de l'océan devient une priorité - L'importance des tropiques confirmée

- Encart : le concept de chaos et l'auto-variation du système climatique

QUE SE PASSE-T-IL À L'ÉQUATEUR ?

La découverte des courants, contre-courants et sous-courants équatoriaux - L'apport historique des navigations circumterrestres - Les alizés et le « pot au noir » identifiés dès le XVIIe siècle - Les courants et contre-courants de surface formellement reconnus au XIXe siècle - La découverte fortuite et oubliée du sous-courant équatorial au XIXe siècle - Sa redécouverte au XXe siècle

La circulation équatoriale - Une première théorie du sous-courant prédit son existence dans les océans Atlantique et Indien - Les théoriciens s'interrogent enfin sur la circulation équatoriale - Le rôle des ondes équatoriales et des « actions à distance »

- Encart : La découverte des contre-courants équatoriaux

L'INTERACTION ENTRE L'OCÉAN ET L'ATMOSPHÈRE

Les modalités de l'échange énergétique entre l'océan et l'atmosphère - La chaleur et l'eau s'échangent à l'interface - Les caractéristiques de l'interaction dans les tropiques

El Niño et l'« Oscillation Australe » - El Niño - L'« oscillation australe » - ENSO - Un premier scénario explicatif d'El Niño - L'instabilité du système oscillant « El Niño - La Niña » - La prévision d'ENSO - L'observation opérationnelle d'ENSO - Les conséquences climatiques et socio-économiques d'ENSO

La convection profonde dans les hautes latitudes - La convection océanique dans l'Atlantique nord - La convection dans les régions antarctiques - La convection dans les mers semi-fermées - la Méditerranée

Les moussons - La mousson indienne - La mousson dans le climat

- Encarts : Aperçu sur l'évolution des théories d'Enso - D'autres oscillations météo-océaniques

LA GÉOCHIMIE DE L'OcéAN ET LE CYCLE DU CARBONE

La géochimie de l'océan - Les traceurs chimiques communs de la circulation océanique - Les traceurs radioactifs naturels - Les traceurs transitoires - Les vrais débuts de la géochimie océanique : Le programme GEOSECS - WOCE renouvelé et GEOSECS trente ans plus tard

Le cycle du carbone dans l'océan - L'océan réabsorbe en partie le CO₂ atmosphérique d'origine anthropique - Incertitudes et questions encore sans réponse - La modélisation du cycle du carbone

LES CLIMATS DU PASSÉ

Les archives climatiques - La paléoclimatologie est née au fond des océans - Comment estimer les paléo-températures ? - Les sédiments marins, mémoire des climats passés

Oscillations glaciaires et interglaciaires - L'océan, régulateur des oscillations climatiques du quaternaire ? - L'implication de l'océan dans les glaciations - L'hypersensibilité climatique de l'Atlantique nord - Le « tapis roulant » peut avoir des ratés

Les coraux témoins de l'histoire des océans tropicaux

Océanographes et paléo-océanographes se rejoignent

- Encart : les facteurs astronomiques déterminants le flux radiatif solaire

L'OcéAN VU DE L'ESPACE

Observer d'en haut pour mieux voir et comprendre - Les débuts de l'observation spatiale civile - Les ondes électromagnétiques au service de l'océanographie

Un projet spatial exemplaire : TOPEX/POSEİDON - La préhistoire de l'altimétrie - L'histoire heureuse et mouvementée du mariage de TOPEX et de POSEİDON - La moisson scientifique de TOPEX/POSEİDON - Les programmes successeurs de TOPEX/POSEİDON : JASON

L'observation spatiale marque l'entrée de l'océanographie dans la géophysique

L'OcéAN DANS LE CHANGEMENT CLIMATIQUE EN COURS

La perturbation anthropique - Retour sur le système climatique et sa variabilité - Le bilan radiatif de la Terre - L'effet de serre - Les observations du changement climatique en cours

L'implication de l'océan dans le changement climatique en cours - L'absorption du gaz carbonique par l'océan - L'absorption de la chaleur par l'océan

Peut-on prévoir l'évolution de l'océan et du climat pour le siècle à venir - Limites et insuffisances des modèles pour prévoir le climat - Qu'est-ce qui nous attend pour la fin du siècle ?

L'OcéANOGRAPHIE MODERNE DANS LE CLIMAT

Les grands programmes - L'Année Géophysique Internationale (AGI) ouvre l'ère des grands programmes - Les programmes météorologiques annexent l'océan dans les années 1970 - Les océanographes prennent le relais - D'autres programmes d'étude du système Terre

Vers l'observation systématique de l'océan - Les systèmes d'observations in situ - Les systèmes d'observations depuis l'espace

La modélisation numérique - Des premiers modèles simples linéaires à deux couches - Des modèles intermédiaires plus sophistiqués - Le « top » des modèles océaniques : les OGCM - La modélisation des systèmes couplés - La modélisation de la turbulence océanique

Naissance de l'océanographie opérationnelle

- Encarts : Les grands programmes internationaux - Le Groupe International sur l'Evolution du Climat

LES ENJEUX DE L'OBSERVATION ET DE LA PRÉVISION DE L'OcéAN ET DU CLIMAT

Les premiers pas de l'océanographie opérationnelle et de la prévision climatique

Le devenir de l'océanographie physique

L'océanographie dans les politiques scientifiques

Les pays de Sud, l'océan et le climat

ÉPILOGUE

► Références bibliographiques - Glossaire

Préface de Jean Labrousse

Lorsque Jacques Merle m'a proposé de préfacer son ouvrage, au delà du fait que j'ai été très sensible à cette offre, j'ai pensé qu'il était judicieux qu'un météorologue préfacer un livre d'océanographie, montrant ainsi, si besoin est, que l'océan et l'atmosphère forment deux des composantes indissociables de la Terre et participent, par leurs interactions, à établir le climat dans lequel s'est développé l'humanité.

Depuis l'école primaire, on nous a appris que l'océan influençait le climat et que, à côté du rôle que joue la latitude, origine d'ailleurs du mot climat, le degré de continentalité et l'altitude, étaient les facteurs prédominants. On nous a même inculqué, à cette occasion, quelques notions de physique, nous expliquant que la différence de capacité calorifique entre l'océan et le sol faisait que l'atmosphère, telle la cigale, « encaissait » très vite l'énergie reçue du soleil par l'intermédiaire de la terre, mais la « dépensait » tout aussi vite, alors que l'océan, par son souci d'économie, réagissait beaucoup plus lentement et était responsable du côté tempéré des climats océaniques par opposition aux excès des climats continentaux. Mais tout cela était, et reste encore, si j'en crois quelques uns des ouvrages scolaires que j'ai pris le temps de feuilleter récemment, essentiellement descriptif.

Je ne vais pas ici rouvrir la vieille querelle entre géographes et certains météorologistes, ces derniers s'étonnant que l'enseignement de la climatologie relève des facultés des lettres et non des sciences. Mais je

veux saisir l'occasion qui m'est donnée ici de rendre hommage à l'excellent travail des géographes. Ne sont-ils pas, avec les travaux d'Emmanuel Le Roy Ladurie, un historien, parmi les premiers à avoir montré que le climat n'était pas immuable mais subissait des variations très au delà de sa variabilité interne ?

L'ouvrage de Jacques Merle a pour mérite de décrire ce passage du descriptif à la quantification scientifique pour l'océan. Il est en effet curieux de constater qu'il a fallu attendre la deuxième moitié du XXe siècle pour que soient bien établis les fondements de l'océanographie physique qui mèneront, au début de ce siècle, à l'établissement de prévisions opérationnelles de l'évolution des océans, semblables aux prévisions météorologiques mais décalée d'un demi siècle par rapport à la météorologie.

Les équations qui régissent les océans et l'atmosphère sont pourtant les mêmes et elles sont connues depuis les années 1920 grâce aux travaux de Navier puis de Stokes et autres Bernouillis. Pourquoi s'est produit ce décalage entre ces deux sciences sœurs du domaine de la géophysique que sont l'océanographie et la météorologie, et pourquoi la prévision météorologique a-t-elle mis plus d'un siècle pour passer au stade opérationnel ?

Je pense qu'une partie de la réponse à cette question tient au fait que les besoins de la société pour des prévisions météorologiques étaient plus pressants que des besoins de prévisions du milieu océanique et que les performances de la prévision météorologique, qui ne dépassait pas deux à trois jours, pouvaient se passer de l'océan. Pour l'autre partie de la question je considère que le livre de Jacques Merle donne les explications nécessaires en ce qui concerne l'océanographie et je me contenterai donc, en quelques lignes, d'évoquer le cas de la météorologie.

Lorsque je suis entré à la Météorologie Nationale, en 1952, je n'ai pas entendu un seul mot de ce qui s'est appelé, plus tard, la météorologie dynamique ! Certes, la France était à l'époque très en retard, et la première prévision numérique du temps datait seulement de deux ans ! Pourtant, après Navier et Stokes, et grâce aux travaux de la « dynastie » des Bjeknes, Carl, Vilhelms puis Jacob, les équations qui régissent l'atmosphère avaient été formulées depuis la fin du 19eme siècle. En 1922 Lewis Fry Richardson, dans « Weather Prediction by Numerical Process », donnait le premier schéma d'intégration de ces équations. Que manquait-il alors pour aller plus vite et plus loin ?

Il fallait seulement remplacer un « orchestre » de calculateurs humains par un calculateur électronique ! Entre le 5 mars et le 7 avril de l'année 1950, une équipe de cinq scientifiques, menés par John Von Neumann et Jules Charney du MIT, à laquelle participait Joseph Smagorinsky, réalisait la première prévision météorologique numérique à 24 heures d'échéance, en utilisant le premier ordinateur construit au monde, l'ENIAC (Electronic Numerical Integrator Analyser and Computer) confié à l'Université de Princeton et au GFDL (Geophysical Fluid Dynamic Laboratory). Ce n'est qu'une dizaine d'années plus tard que la prévision numérique du temps devait devenir opérationnelle. En 1979, des prévisions météorologiques à l'échéance de dix jours étaient produites pour la première fois en Angleterre au Centre Européen de Reading et quelques années plus tard, les modèles, d'abord purement atmosphériques, puis océano-atmosphériques, fournissaient les premières simulations de l'évolution du climat. Je noterai au passage que dans les années soixante, Joseph Smagorinsky, et son équipe du GFDL, avaient déjà obtenu, grâce à leur modèle de circulation générale de l'atmosphère (GCM), des simulations réalistes du climat.

Au delà du rôle essentiel joué par quelques scientifiques de grande qualité, tout ceci n'a été rendu possible que grâce à la construction d'ordinateurs de plus en plus rapides, et à la mise au point de systèmes de mesures permettant de couvrir la totalité du globe, en particulier à partir de plateformes spatiales. A cela s'ajoute une coopération scientifique internationale exemplaire, entièrement libre, c'est à dire que les modèles ont toujours été, et sont encore, librement échangés entre les équipes. Si notre communauté n'a que des possibilités d'actions limitées sur les développements informatiques, son action pour que les systèmes d'observation et de traitement des données continuent de se faire sur la base du libre échange, est essentielle.

La connaissance de l'évolution du climat et donc des possibilités de prendre des mesures pour limiter ses dérives dues aux activités humaines, ne peut être que le résultat d'une action menée en commun par les scientifiques du monde entier. Cet exemple de coopération doit servir de modèle à bien d'autres activités relevant du bien commun de notre planète et de ses habitants. Je voudrais donc terminer cette préface en saluant le travail de Jacques Merle qui doit permettre à un vaste public de prendre conscience des progrès accompli, et surtout de ceux qui restent à faire, au profit de chacun d'entre nous.

Mais j'ai un vœu personnel supplémentaire : c'est un appel aux pouvoirs publics pour que soient pérennisés les moyens d'observations, ainsi que le libre échange, des données et des modèles, sans considérations mercantiles, et que soient, au moins sur le plan opérationnel, mises en place des structures qui

reconnaissent l'indissociabilité de l'océan et de l'atmosphère.

Jean Labrousse

Ancien Directeur Général de la Météorologie Nationale (devenue Météo-France)
Ancien Directeur du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme.

Préambule

La connaissance du rôle de l'océan dans le climat a fait un bond considérable en quelques décennies pour amener l'océanographie du statut d'une science essentiellement descriptive, proche de la géographie, à celui de la géophysique. Cette évolution rapide s'est faite sous l'impulsion de la nécessité de comprendre le rôle de cette enveloppe fluide essentielle de notre environnement dans les mécanismes générateurs du climat et de son évolution. Longtemps l'océanographie avait été enseignée par des géographes qui montraient sur des cartes les courants marins, et les propriétés de la mer, telles que la température et la salinité, supposés immuables comme un paysage. Le Gulf Stream, courant chaud, susceptible de tempérer le climat breton, ou celui des fjords de Norvège, était présenté comme le trait le plus emblématique du rôle de l'océan sur le climat. Mais ces considérations ne touchaient que la surface de l'océan et étaient purement qualitatives. L'intérieur de la masse liquide océanique était presque totalement inconnu ainsi que les mouvements qui pouvaient l'animer, les forces qui sous-tendaient cette dynamique et l'interaction permanente qu'elle avait avec l'atmosphère, l'autre enveloppe fluide qui entoure notre planète.

La variabilité de l'océan et du climat était encore ignorée au XXe siècle

Il est étonnant pour nos contemporains, et ce sera peut-être encore plus frappant pour les historiens futurs qui se pencheront sur notre époque, de constater qu'il fallut attendre la fin du XXe siècle pour que l'humanité prenne enfin conscience de l'importance de l'océan, milieu essentiel de notre environnement, et de son rôle dans le climat de la Terre et son évolution. Et pourtant, le milieu océanique domine et caractérise notre planète bleue. L'océan recouvre près des trois quarts de la surface de la Terre sur une profondeur moyenne de 3,8 km. Il rassemble 97 % de l'eau contenue à la surface de la Terre et il absorbe et stocke plus de 70 % de toute l'énergie qui nous vient du Soleil avant de la restituer en partie à l'atmosphère.

Considéré dans l'Antiquité comme un domaine mystérieux situé entre celui des hommes et celui des dieux tant son accès était jugé difficile, l'océan a intrigué, effrayé, mais aussi fait rêver les hommes depuis la nuit des temps. Pendant longtemps cependant ils n'ont connu que sa surface. Fascinés par la fuite de son horizon, ils ne percevaient qu'un monde sans limite, à traverser vers un ailleurs à explorer ou à conquérir pour s'y installer. L'histoire de cette conquête progressive de terres nouvelles par des explorateurs/navigateurs aventureux, qui ne connaissaient que la surface des mers, n'est pas l'objet de cet ouvrage. Cependant pour mieux situer l'évolution actuelle de la connaissance de l'océan, on esquissera un bref panorama de cette conquête en insistant plus particulièrement sur la période débutant au XVe siècle avec les Portugais et les Espagnols qui commencèrent à s'intéresser à l'océan pour lui-même en pratiquant les premières observations de nature scientifique en surface et en profondeur. Quelques uns de ces découvreurs et précurseurs de l'étude de l'océan seront évoqués.

Parallèlement à cette méconnaissance de l'océan, le climat n'intéressait, lui non plus, presque personne dans les années 1950-1960. Il était supposé immuable à l'échelle humaine depuis que s'est établi l'optimum interglaciaire chaud de l'Holocène, il y a environ 5 000 ans, faisant suite à la dernière glaciation qui culmina il y a 18000 - 20 000 ans. Les services météorologiques se contentaient de consigner leurs observations dans des fichiers desquels ils extrayaient des moyennes sur une période de trente ans supposées représenter ce climat moyen. Comme pour l'océan, les géographes étaient les seuls scientifiques à décrire les climats de la Terre et à en dresser des cartes. Mais les notions de variabilité et de dynamique du climat étaient encore absentes des esprits. La physique qui sous-tendait cette dynamique était presque totalement ignorée.

Des historiens nous font découvrir la variabilité du climat

Curieusement, c'est un historien français, Emmanuel Leroy Ladurie, qui a beaucoup contribué, à la fin des années 1960, à la prise de conscience de la variabilité du climat à l'échelle des générations humaines, de quelques décennies à quelques siècles. En compulsant les archives disponibles pour en extraire des indicateurs météorologiques et climatiques, tel que la date des vendanges, il montra que le climat avait significativement varié depuis l'an mil et que ces changements étaient en relation avec des évènements historiques majeurs tels que la Révolution Française, conséquence plus ou moins directe de disettes liées à des hivers particulièrement rigoureux. Le climat était donc susceptible d'évolutions encore inexpliquées comme ce « Petit âge glaciaire » qui marqua l'hémisphère nord par une baisse de sa température moyenne de près de 1°Celsius et se manifesta par des hivers très froids (la Seine gelaît fréquemment à Paris) pendant environ deux siècles, du milieu du XVIIe siècle au milieu du XIXe siècle. L'ouvrage d'Emmanuel Leroy Ladurie, fréquemment cité, constitua une sorte d'alerte et surtout une prise de conscience par la communauté scientifique et le public de la variabilité du climat à court terme.

D'autres considérations de nature géopolitiques, qui ont leur importance dans cette prise de conscience et qui font également partie de l'histoire, émergèrent aussi dans les années 1960-1970. La guerre froide battait son plein. Il devenait important à l'est comme à l'ouest de pouvoir prévoir, avec assez de précision, la production agricole du camp

d'en face et d'évaluer ainsi sa dépendance à une possible pénurie alimentaire, notamment en céréales. Le projet de prévoir le climat fut donc aussi, au début, la conséquence d'un enjeu géostratégique.

Ce n'est qu'un peu plus tard, dans les années 1980, que le sentiment d'une détérioration générale de l'environnement global de la planète, due à une activité industrielle croissante et mal contrôlée, s'imposa à l'esprit des populations et remplaça les intérêts militaires et géostratégiques initiaux, rendus d'ailleurs partiellement caduques par la fin de la guerre froide.

Le climat dans l'environnement planétaire

Ces préoccupations climatiques nouvelles renforcèrent l'intérêt de l'homme de la fin du XXe siècle pour son environnement, rejoignant des mouvements antérieurs de défense de la nature, principalement soucieux de protéger la diversité du milieu vivant menacée par son exploitation et de maîtriser des pollutions de toute nature. La question du climat est donc venue s'inscrire dans un contexte plus large, celui de l'environnement. Mais qu'est-ce que l'environnement et qu'est-ce que le climat ? On peut définir l'environnement planétaire comme l'ensemble des milieux physiques et biologiques qui entourent l'homme et conditionnent son développement et sa survie. Cela va du support solide de la Terre : la lithosphère, jusqu'au monde vivant, la biosphère, y compris l'homme, en passant par l'eau liquide (océan compris), l'hydrosphère, l'eau solide, la cryosphère, et bien sûr l'air, l'atmosphère. Les interactions extrêmement complexes qui lient ces différents milieux, dans lesquels s'exerce depuis déjà quelques siècles l'action de l'homme, acteur actuel principal de la biosphère, déterminent cet environnement planétaire et conditionnent son évolution. Le climat, c'est à dire l'état physique et dynamique moyen de l'atmosphère, enveloppe gazeuse qui nous entoure, que l'on respire et dans laquelle s'organise notre vie, est la résultante des interactions des nombreux paramètres caractérisant les milieux précités qui déterminent notre environnement. Le climat est un élément de l'environnement. Il est défini par les météorologues par la moyenne sur une période de trente ans, et en un lieu donné, des paramètres météorologiques usuels : température, pression, précipitation, vent, insolation... Il est principalement défini par la latitude du lieu, sa plus ou moins grande proximité de l'océan, son altitude. Mais sa caractéristique essentielle, qui résulte de ses relations complexes avec les milieux qui le conditionnent, est sa variabilité au cours du temps. Le climat n'est pas stable, il varie à toutes les échelles temporelles. Cette variabilité est une découverte et une prise de conscience majeure des sciences de l'environnement des années 1970.

A long terme, aux échelles géologiques, les « forçages » externes sont prépondérants et ils conditionnent les différents climats qu'a connus la Terre et qui sont étudiés depuis longtemps par les géologues et les paléo-climatologues. Ils sont liés à la position de la Terre par rapport au Soleil et à la quantité d'énergie qu'elle reçoit de celui-ci en un point donné. Ils sont liés aussi à l'activité interne terrestre propre qui peut s'exprimer par des phases d'éruptions volcaniques intenses ou des variations de la géométrie des continents soumis à la tectonique des plaques.

A court terme, il est inutile de chercher des « forçages » externes qui ont très peu varié. La variabilité du climat est la résultante de l'interaction de tous les milieux terrestres précités. On dit que le système, composé de ces milieux, est affecté par une « auto-variation » propre qui résulte des disparités des temps d'ajustement des éléments du système et qui font qu'un état d'équilibre stable unique n'est jamais atteint. On a affaire à des processus partiellement chaotiques qui limitent considérablement la capacité de prévoir l'évolution du système (de même il est impossible de faire une prévision météorologique au-delà de 2 à 3 semaines du fait des processus chaotiques qui affectent l'atmosphère). Néanmoins l'océan, comme on le verra, est l'élément le plus stable du système climatique, celui qui évolue le plus lentement et qui est susceptible de mémoriser longtemps les perturbations qui l'ont affecté. Sa forte implication dans la variabilité du climat offre donc un potentiel de prévision substantiel comme on le verra dans l'étude de signaux climatiques résultants d'interactions entre l'océan et l'atmosphère, tels que El Niño et d'autres oscillations.

Climat, météorologie et océanographie

Les deux milieux les plus importants du système climatique sont l'atmosphère et l'océan, en y incluant la glace de mer (partie de la cryosphère). L'atmosphère est étudiée depuis longtemps par la météorologie pour prévoir quotidiennement le temps - Les premières prévisions météorologiques datent du milieu du XIXe siècle. La météorologie bénéficie actuellement de réseaux d'observations solidement établis et d'organisations internationales permettant la mise en commun de ces observations. De puissants calculateurs permettent de résoudre numériquement les équations qui régissent ses mouvements ouvrant la voie à des prévisions de plus en plus fiables, à des échéances de plus en plus éloignées, théoriquement limitées cependant à 2 ou 3 semaines par la nature chaotique du comportement du fluide atmosphérique.

Mais c'est seulement dans les années 1970 que les météorologues se sont rendus compte que la seule considération de l'atmosphère ne suffisait pas pour affiner la prévision du temps. Ils devaient prendre en compte aussi l'évolution des conditions thermiques et dynamiques de la surface des océans, principale « condition aux limites » du système atmosphérique et qui détermine les échanges d'eau et de chaleur entre l'atmosphère et l'océan. Des opérations communes entre océanographes et météorologues furent lancées dès cette époque, dans l'Atlantique notamment, pour mieux comprendre les interactions intenses entre les deux sphères fluides qui généraient dans les régions tropicales des événements météorologiques violents tels que les cyclones. Ce furent les " premières rencontres " liant les deux disciplines scientifiques, mais celles-ci ne parlaient pas encore entre elles du climat et de sa prévision. Ce fut néanmoins le départ d'une coopération entre les deux communautés qui ne se démentit pas et prit une autre dimension dans le futur avec la question climatique.

L'implication de l'océan dans le comportement de l'atmosphère et de son état moyen définissant le climat, bien qu'intuitivement soupçonnée, était encore imparfaitement démontrée, même qualitativement, jusqu'à ce que les premiers ordinateurs, à partir des années 1970, aient permis de rassembler et de compiler l'ensemble des observations météorologiques et océanographiques accumulées depuis déjà près d'un siècle et demi dans les banques de données. Ces compilations permirent d'établir des bilans dans chacun des deux milieux, notamment des bilans d'énergie, de chaleur et de masse, et de quantifier les échanges de ces propriétés à l'interface des deux milieux fluides. Ce fut le point de départ d'une coopération encore plus étroite entre atmosphériciens et océanographes qui déboucha sur une formidable avancée des connaissances au cours des années qui suivirent.

Mais il n'y a pas symétrie parfaite entre les avancées des atmosphériciens et celles des océanographes. L'étude de la dynamique de l'enveloppe liquide était en retard par rapport à celle de l'enveloppe gazeuse, bien que les deux milieux, régis par les mêmes équations, soient très voisins d'un point de vue mécanique. Depuis le début du XXe siècle, les nécessités de la prévision météorologique avaient contraint les météorologues à formuler la dynamique de l'atmosphère en termes mathématiques rigoureux et, avec l'avènement des calculateurs électroniques des années 1970, ces équations furent résolues numériquement, permettant d'accéder à une prévision météorologique scientifiquement fondée, différente par nature des prévisions empiriques antérieures basées principalement sur l'expérience et le flair des prévisionnistes. Parallèlement, la connaissance de l'océan était loin de permettre une quelconque prévision de son évolution, et cette prévision n'avait que peu de « clients » potentiels. La navigation commerciale et la pêche étaient les seuls bénéficiaires possibles d'une connaissance approfondie de sa dynamique et d'éventuelles prévisions.

L'océanographie sort de son Moyen Âge

En océanographie, le retard était en effet considérable. Dans les années 1950, la connaissance de la dynamique de l'océan et de ses interactions avec les autres milieux planétaires était encore balbutiante. Les grandes campagnes océanographiques de la fin du XIXe siècle et du début du XXe, principalement motivées par la nécessité d'assurer la sécurité de la navigation et de permettre une exploitation plus rationnelle des ressources vivantes océaniques, avaient permis d'obtenir une image seulement grossière de l'état moyen de l'océan. Quelques avancées théoriques reposant sur des modèles mathématiques simples rendaient compte de certains aspects de la circulation générale océanique moyenne, approchée par de rares observations. On connaissait les grands courants océaniques de surface tels que le Gulf Stream dans l'Atlantique ou le Kuro Shivo dans le Pacifique, et leur rôle supposé sur l'adoucissement du climat de certaines régions d'Europe occidentale et du Pacifique nord, et on s'efforçait d'en décrire les caractéristiques et d'en comprendre la dynamique.

Des questions faisaient débat parmi les océanographes de l'époque : pourquoi ces grands courants océaniques s'intensifiaient-ils sur les bords ouest des bassins océaniques et pourquoi étaient-ils plus intenses aux latitudes moyennes comprises entre 20° et 40° ? Quelle était la part de l'océan dans le nécessaire transfert thermique qui s'opère des tropiques vers les hautes latitudes pour équilibrer le différentiel d'énergie reçue du soleil entre les basses et hautes latitudes ? Quel rôle pouvait jouer un sous-courant équatorial récemment découvert, opposé au sens des vents (alizés) et des courants dominants, mais qui restait une curiosité inexpiquée, bien que l'on soupçonnât déjà le rôle de la singularité mécanique de l'équateur liée à la rotation de la terre ?

À partir des années 1970, tout changea avec la nécessité de mieux comprendre le rôle de l'océan dans la variabilité du climat. Les trois dernières décennies du XXe siècle peuvent être qualifiées des « trente glorieuses » de l'océanographie physique et auront certainement leur place dans l'histoire des sciences du XXe siècle. Elles ont apporté des avancées décisives dans de nombreux domaines de la connaissance de l'océan. Parmi celles-ci, on peut citer la mise en évidence de la variabilité temporelle de la circulation océanique et son caractère tourbillonnaire dans une large gamme de fréquences temporelles et spatiales. La compréhension des mécanismes entretenant les phénomènes de convection, semblables et symétriques à ceux de la convection atmosphérique, fut aussi une étape importante. Ces phénomènes de convection, sont en effet principalement localisés dans les régions nord atlantiques, mais aussi en Méditerranée, et sont responsables de la plongée rapide d'eaux denses et froides déterminantes dans le fonctionnement de la machine thermique planétaire.

Mais, au cours de ces années, ce sont surtout les régions tropicales qui concentrèrent l'attention de la communauté internationale, attirée par les impacts climatiques de phénomènes océaniques et météorologiques spectaculaires qui affectaient l'océan Pacifique et sa basse atmosphère, et qui étaient connus depuis des siècles sous le nom de « El Niño ». La mise en évidence de l'interaction des océans tropicaux avec la basse atmosphère, à l'origine de cette variabilité climatique saisonnière et pluriannuelle, observée de longue date dans le Pacifique, stimula la recherche pendant plusieurs décennies pour aboutir au suivi opérationnel et à la prévision actuelle. Longtemps considérées seulement comme une curiosité, les « étrangetés » du monde équatorial prirent une autre dimension lorsque l'on comprit que la circulation océanique très particulière des basses latitudes, liée à la rotation de la Terre, était impliquée dans ces phénomènes climatiques parfois violents. Des transports de masse et de chaleur très rapides d'un bord à l'autre du vaste océan Pacifique, facilités par des courants et des ondes confinés dans la bande équatoriale, perturbaient l'atmosphère au point de modifier le climat le long de leur parcours équatorial, générant ainsi une oscillation climatique de grande amplitude couplant l'océan et l'atmosphère, qui fut appelée Enso (El Niño Southern Oscillation), et longtemps considérée comme unique au monde.

Les dimensions nouvelles de l'océanographie

Pour comprendre ces phénomènes dans les tropiques, et ailleurs dans les plus hautes latitudes, il fallait d'abord les observer et pour cela rassembler des moyens hors de portée des scientifiques d'un seul pays. Un effort international était nécessaire. De grands programmes, océanographiques et météorologiques, mis au point par des organisations internationales principalement dépendantes de l'Organisation des Nations Unies (ONU), furent déployés. Par les observations qu'ils ont accumulées, les échanges d'idées et les débats scientifiques sans frontière qu'ils ont suscités, ces programmes internationaux ont apporté des réponses aux questions scientifiques, qui se sont posées progressivement, avec une efficacité démultipliée. Ils ont fait progresser la connaissance des relations entre l'océan et le climat comme jamais auparavant. Ces grands programmes, qui rassemblèrent étroitement les scientifiques de plus d'une trentaine de nations, stimulèrent également les techniques de simulations numériques que permettaient maintenant des calculateurs de plus en plus puissants. Le mariage des simulations avec les observations par des techniques mathématiques connues sous le terme d'« assimilation des données » dans les modèles, permirent d'accéder à des images de la réalité océanique d'une précision et d'une qualité inconnue jusqu'ici. Par ailleurs, ces modèles ont aussi permis de réaliser pour la première fois une prévision climatique à court terme, certes encore rudimentaire, mais qui fut utilisée, dès les années 1990, par certains pays en développement (Equateur, Pérou) riverains des régions océaniques affectées par ces phénomènes destructeurs.

Les trente dernières années ont également vu l'apparition d'une nouvelle génération d'océanographes, qui ont bouleversé les techniques d'observations de l'océan et développé de nouveaux concepts par l'utilisation de capteurs embarqués sur des satellites artificiels de la Terre. En quelques années, à partir de la décennie 1970, l'observation spatiale a permis de passer d'une approche régionale et ponctuelle de l'océan par de rares observations in situ à une vision globale, synoptique et continue dans l'espace et le temps à laquelle s'ajoute l'observation des milieux connexes de l'environnement planétaire, principalement l'atmosphère et la Terre solide. Les premiers paramètres océaniques observés depuis l'espace furent la température de surface, le vent, la couleur de l'océan (étroitement dépendante de sa productivité biologique) à l'aide de capteurs dits « passifs », encore appelés radiomètres, car ils mesuraient le rayonnement émit. Mais le plus fécond de ces instruments placés à bord de plates-formes spatiales fut certainement l'altimètre radar qui est un « capteur actif » car il émet et reçoit à la fois un signal électromagnétique. Cet instrument est capable de mesurer l'altitude absolue de la surface océanique avec une précision voisine du centimètre. Un programme franco-américain, Topex-Poseidon, lancé en 1992, a engendré des avancées considérables dans plusieurs domaines, la circulation générale des océans, la marée, l'état de la surface de la mer, les ondes équatoriales. Ces dernières sont très importantes car, au cœur des mécanismes d'interactions qui constituent El Niño et prévues par la théorie, elles restaient difficilement observables par des instruments traditionnels in situ avant cette nouvelle ère des altimètres radar.

Enfin, il est un autre domaine où l'océan croise le climat, c'est celui de la géochimie. L'implication de l'océan dans la variabilité du climat ne se limite pas à son interaction mécanique et thermodynamique avec l'atmosphère. L'océan est aussi le réceptacle de nombreux constituants chimiques de la Terre, y compris les éléments les plus courants et les plus actifs dans la vie de la planète. Le plus important de ces éléments, le carbone, dont le cycle passe par l'océan, joue un rôle critique dans le climat. En effet, l'activité humaine, et notamment le développement industriel récent, utilise le carbone fossile puisé dans la lithosphère et le rejette dans l'atmosphère, principalement sous forme de dioxyde de carbone. Celui-ci contribue à accroître l'effet de serre qui piège le rayonnement terrestre dans les basses couches atmosphériques, augmentant ainsi la température moyenne de la planète. Les océans sont susceptibles de réabsorber une partie importante du gaz carbonique émis dans l'atmosphère, et de ce point de vue aussi les régions tropicales jouent un rôle privilégié dans les phénomènes d'absorption ou de dégazage liés aux températures élevées de leur couche superficielle. La fixation du carbone opérée par la production de phytoplancton, ou plancton végétal, abondant dans ces régions, tient aussi une place importante.

Par ailleurs, les sédiments déposés au fond des océans et des lacs, les glaces des régions polaires, les débris fossiles d'animaux ou de végétaux sont riches d'enseignements sur les climats anciens qui ont modelé la Terre il y a des millions d'années. C'est le domaine de la paléoclimatologie, qui rejoint la climatologie pour nous aider à mieux comprendre comment notre climat est arrivé à son état actuel, comment il peut évoluer dans le futur et quel est le rôle de l'océan dans ces variations à très longs termes.

L'objet de cet ouvrage

Une génération de chercheurs océanographes a ainsi vu l'état des connaissances de son domaine scientifique, l'océanographie physique, faire un bond considérable, pour aboutir au début du XXI^e siècle aux premières esquisses de la prévision opérationnelle de l'évolution de l'océan et du climat. Ces acquis, rapides et spectaculaires, s'appuient aujourd'hui sur des modèles numériques et sur des réseaux d'observations continues en mer et depuis l'espace, prenant en compte les phénomènes physiques dominants qui régissent les mouvements de l'océan et son interaction avec l'atmosphère. Cet ouvrage décrit cette avancée des connaissances dans sa dimension historique.