

Pour demain, la prévision du temps et du climat

Jean-Claude ANDRE

En guise d'introduction

Nous allons partir pour une promenade, que j'espère agréable et informative, à travers la météorologie et la climatologie. Nous essaierons de comprendre quels en sont les enjeux, quels sont les éléments solides sur lesquels nous pouvons nous appuyer, quels sont les espoirs raisonnables pour demain, et quelles sont les utopies, puisqu'il est certain que nous en trouverons quelques unes en chemin. Je donnerai quelques éléments explicatifs sur les phénomènes atmosphériques, météorologiques, et climatiques et quelques idées sur la façon dont ils ont été perçus au cours de l'histoire ; nous prendrons conscience de ce qu'est le système **météo-climatique**, c'est-à-dire l'ensemble de l'atmosphère et de l'océan. Nous ferons le point sur ce qu'est la **prévision météorologique** et sur ses réalisations actuelles. Nous tenterons de nous projeter dans le futur pour voir ce que demain pourra nous proposer, en

particulier du côté des phénomènes très localisés et de leur description spatiale. Nous parlerons de l'espoir qui s'ouvre actuellement d'élaborer des prévisions saisonnières. Nous parlerons aussi de ce que nous savons du climat, de sa **modélisation** et de sa compréhension. Nous essaierons de voir ce que nous pouvons espérer de la **prévision climatique pour demain**, et, pourquoi pas, de la modification du temps qui reste un vieux rêve de l'homme.

De la météorologie à la climatologie

Pour commencer cette promenade, il est utile de récapituler l'ensemble des phénomènes qui intéressent l'atmosphère, qui sont tantôt classés sous l'appellation météorologique et tantôt sous l'appellation climatique, et qui nous sont proposés comme défi à la compréhension et à la prévision. Certains peuvent être prévus à très courte échéance de temps : si vous êtes par exemple spectateur à Roland Garros, vous savez que maintenant il est annoncé deux heures avant si la pluie va venir ou non interrompre le jeu. Si vous êtes responsable de la sécurité routière, vous êtes intéressé à savoir ce qui va se passer la nuit suivante par exemple en ce qui concerne le brouillard sur l'autoroute : le brouillard va-t-il se former, si oui à quelle heure va-t-il se dissiper ? Si vous faites tout simplement partie du grand public, c'est le temps qu'il fera demain qui vous intéresse. Si vous êtes responsable du transport aérien, il vous importe de savoir quelle sera la force du courant jet au-dessus de l'Atlantique, ce courant fort qui va freiner la traversée ou au contraire l'accélérer, qui fera économiser du carburant ou au contraire en fera dépenser un peu plus. Si vous êtes marin, vous êtes intéressé à savoir si lors de votre croisière de la semaine prochaine vous allez avoir à faire face ou non à une tempête.

Jusque là les problèmes et les préoccupations relèvent de la météorologie au sens classique du terme. Mais ce ne sont pas les seules questions que l'on pose aux météorologues car on leur demande de se projeter un peu plus loin dans l'avenir. Si par exemple vous entreprenez une traversée en solitaire, vous aurez envie de disposer d'un routage qui vous permettra de passer au mieux à travers les systèmes dépressionnaires, qui vous permettra de profiter au mieux des alizés : vous chercherez donc des indications précises à l'échéance de plusieurs semaines. Si vous êtes agriculteur, vous souhaiteriez savoir si l'été prochain sera chaud et sec, ce qui vous permettrait de déterminer quelle culture sera la mieux adaptée et la plus

rentable. On peut poursuivre ainsi vers les échéances croissantes : si vous êtes décideur, si vous avez à planifier les systèmes de production énergétique pour faire face demain à une augmentation de la température globale de la planète liée à l'effet de serre, vous avez besoin de vous projeter dix ou vingt ans en avance. Si, enfin vous vous préoccupez « simplement » de l'histoire de la terre, vous voulez savoir si le monde est en route vers une nouvelle époque glaciaire ou si l'on n'a pas encore atteint l'optimum climatique. L'ensemble de ces phénomènes à beaucoup plus longue échéance relève de la climatologie.

Tailles et durées de vie des structures atmosphériques

Je voudrais aussi vous montrer, qu'à chaque fois qu'il y a une notion d'échéance que nous appellerons « échelle de temps », il y a toujours cachée derrière la notion de taille des phénomènes que nous appellerons « échelle d'espace ».

La **figure 1** présente une vision un peu déformée du globe terrestre. On y reconnaît sans problème l'Afrique, l'Amérique du Sud, l'Asie. Nous sommes égo-centriques, nous avons mis la France au milieu. Si vous voulez savoir quels phénomènes atmosphériques vont intéresser la France dans les vingt quatre heures à venir,

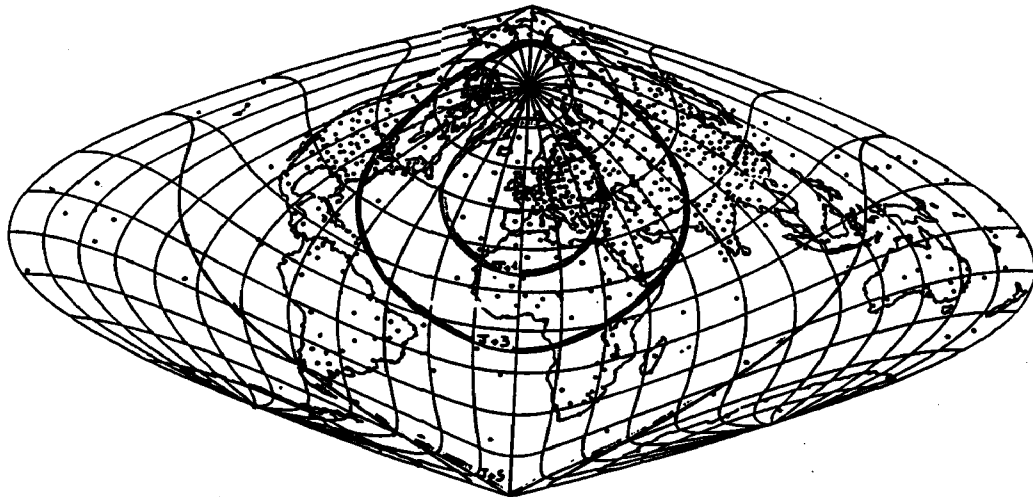


Figure 1

répartition mondiale des stations de radiosondage.

Le schéma indique en outre les régions sur lesquelles des observations sont nécessaires pour des prévisions à échéances de J+1, J+3, J+5 (cliché CEPMMT)

il faut que vous sachiez décrire aussi précisément que possible tout ce qui se passe à l'intérieur du premier cercle : les phénomènes qui à un moment donné prennent place à l'intérieur de ce cercle vont, vu leur vitesse de propagation, pouvoir atteindre la France dans un délai de vingt quatre heures. Si au contraire, on s'intéresse à une échéance plus longue, de l'ordre de trois jours, le cercle qui englobe les phénomènes importants est beaucoup plus large, puisqu'il inclut par exemple une bonne partie de l'Afrique, tout l'Atlantique et une partie des Etats-Unis. Si l'on s'intéresse à des phénomènes qui nous concerneront dans un délai de cinq jours, c'est la quasi totalité de la terre qui est concernée, l'Australie seule peut être restant en dehors. Aux échéances encore plus longues, il est clair que le problème ne peut plus être traité de façon «locale», on est obligé de prendre en compte la totalité des phénomènes. Je reviendrai assez souvent sur cette idée que, à échéance donnée, seuls certains phénomènes de tailles particulières peuvent être prévus : à échéance de plus en plus longue, on ne peut s'intéresser qu'à des phénomènes de plus en plus grands.

Un peu d'histoire

Les problèmes étant maintenant posés, la question est de savoir comment ils vont pouvoir être abordés. Je ne résiste pas au plaisir de rapporter la vision d'un fort brillant météorologue britannique qui vivait au début du XXème siècle, qui s'appelait Lewis Richardson, et qui avait inventé un système prémonitoire. A l'époque on connaissait bien les lois physiques qui décrivent les mouvements de l'atmosphère. On savait que ces mouvements de l'atmosphère obéissent aux lois communément appelées de Navies-stokes, qui décrivent la dynamique ; on savait aussi que l'atmosphère obéit aux principes de conversion d'énergie qui nous sont familiers. On connaissait donc les mécanismes de base. Richardson, conscient que ces équations sont fort complexes et qu'il est impossible de les résoudre simplement avec du papier, un crayon et une cervelle d'aussi bonne qualité soit-elle, avait en quelque sorte inventé l'ordinateur humain. Le dessin qu'il en faisait (**Figure 2**) résume sa vision de la prévision météorologique, telle qu'exprimée en 1920 :

«Imaginez une grande salle de théâtre, entièrement circulaire et où les galeries monteraient jusqu'au plafond. Les murs seraient peints avec une représentation de la terre, le pôle Nord au plafond, ... le pôle sud dans l'orchestre. Une myriade de

calculateurs travaillent sur le temps correspondant à la partie de la carte où ils se trouvent, mais chacun ne s'occupe que d'une équation ou d'une partie d'une équation. Dans chaque région un «contremaître» coordonne le travail. De nombreux indicateurs visuels affichent les valeurs instantanées pour que les autres calculateurs puissent les utiliser ... Une grande colonne s'élève de l'orchestre jusqu'à mi-hauteur... En haut se trouve le responsable général. Il est entouré d'assistants et de messagers. Il est chargé en particulier, à la manière d'un chef d'orchestre, de maintenir un rythme de calcul uniforme . Ici les instruments sont des règles à calcul mais au lieu d'agiter un bâton il dirige un jet de lumière rose sur les régions en avance et de lumière bleue sur celles en retard.»

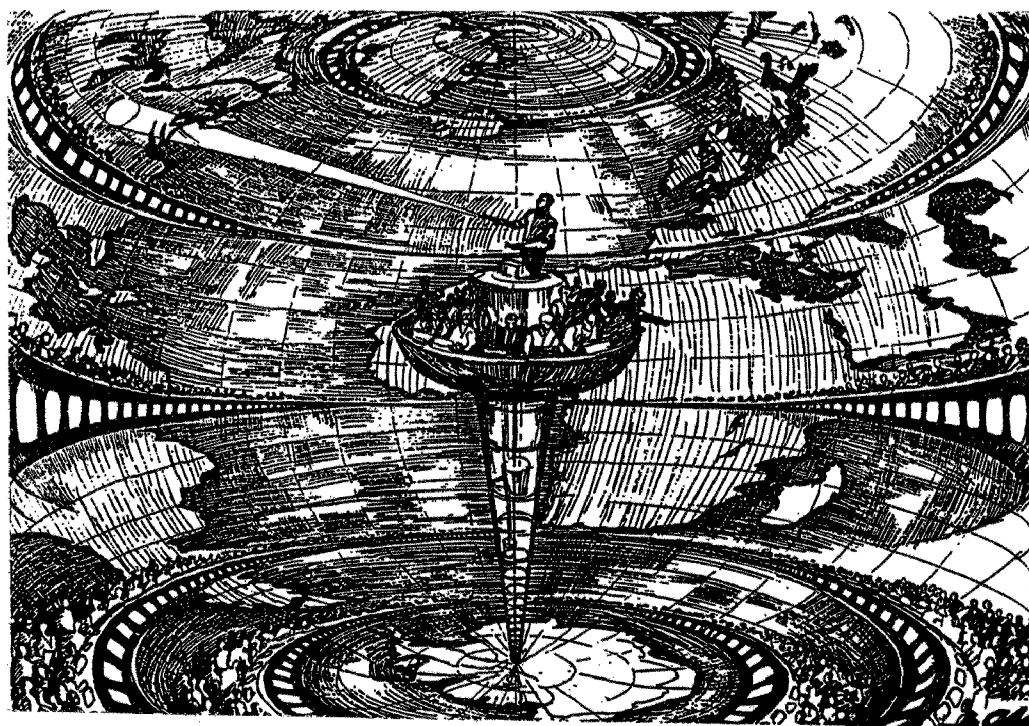


Figure 2

L'ordinateur météorologique humain de Lewis F. Richardson

Ceci est déjà une vision assez pertinente de ce qui se passerait quelques trente ou quarante ans plus tard. Le reste de la vision est tout aussi prémonitoire:

«Quatre techniciens chevronnés récupèrent le temps prévu au fur et à mesure et l'envoient par pneumatique dans une pièce calme. Là il sera codé et envoyé

par téléphone à la station radio chargée de l'émettre... Dans un bâtiment annexe, il y a un établissement de recherche où sont inventées des améliorations. Mais il faut faire de nombreuses expériences avant tout changement dans le système opérationnel complexe du grand théâtre.»

Je n'ai pas résisté au plaisir de rendre hommage à la puissance d'imagination de Lewis Richardson. L'expérience qu'il a ainsi tentée n'a pas réussi, tout simplement parce que, aussi imaginatif qu'il ait été, il n'avait pas conscience des relations entre espace et temps. Il y a en effet une vitesse maximale que l'on ne peut pas dépasser pour prévoir les phénomènes. Richardson faisait quant à lui travailler ses différents calculateurs humains avec des «pas-de-temps», des avances dans le temps, trop longs, par rapport à ce qui est possible pour la résolution spatiale qu'il s'était donnée. Il s'était donc heurté à ce que les mathématiciens ont découvert un peu plus tard, (qui s'appelle du nom barbare de critère de «Courant Fredrich-Lévy» (CFL). Il ne le connaissait pas et sa prévision manuelle a donc échoué bien que le reste de sa vision se soit ensuite révélée tout à fait juste. En fait le début de la prévision météorologique moderne date de l'immédiat après-guerre, et le premier article scientifique de grande valeur paru sur le sujet date de 1950. Cosigné d'un nom aussi prestigieux que celui de Joseph Von Neuman. J. Von Neuman a été à la source du développement des calculateurs électroniques, et la première prévision météorologique, avec un modèle d'atmosphère certes relativement simplifié, a été faite sur le premier calculateur électronique jamais réalisé, la fameuse machine dite «ENIAC».

Le système météo-climatique

Ces quelques éléments ont permis de quelque peu se replacer dans le contexte. On a parlé brièvement du système météo-climatique à travers la vision qu'en avait Richardson. Il faut peut être le décrire un peu plus avant. L'atmosphère est une pellicule qui entoure la planète, pellicule extrêmement fine puisque son épaisseur se mesure en kilomètres ou en dizaines de kilomètres au maximum et que son extension horizontale se mesure en milliers, voire en dizaine de milliers, de kilomètres, ce qui donne un rapport de un à mille environ entre l'épaisseur et l'étendue horizontale, et qui se révèle très important pour nombre de phénomènes. On connaît les lois qui décrivent son mouvement depuis plus d'un siècle. L'énergie lui est

fournie par le rayonnement solaire, qui la traverse puis est absorbée par le sol et l'océan avant que la chaleur ne reparte vers elle. Les conversions d'énergie obéissent au premier principe de la thermodynamique. Il faut de plus prendre conscience que l'eau est à l'origine de phénomènes tout à fait prépondérants pour l'évolution de l'atmosphère, de la météorologie et de la climatologie. L'eau est le composant qui amène toute la complexité et toute la richesse du comportement de l'atmosphère. D'une part, sans eau, notre terre ne serait pas habitable et la vie n'aurait pas pu s'y développer. Nous verrons d'autre part, à travers des éléments ultérieurs, qu'à chaque fois qu'il y a incertitude ou défi à relever quant à la compréhension de l'atmosphère, cette incertitude ou ce défi sont le plus souvent relatifs à une méconnaissance de la façon dont l'eau circule dans le système météo-climatique.

L'atmosphère turbulente

L'autre grande complication qui se dresse sur la route du météorologue et du climatologue est l'extrême diversité de tailles de mouvements et de phénomènes qui coexistent dans l'atmosphère. Quelques images seront suffisantes pour montrer que, quelle que soit la façon dont on regarde l'atmosphère, on y découvre une multiplicité d'échelles spatiales imbriquées.

La **figure 3** montre l'atmosphère telle qu'observée depuis un satellite se trouvant à 36.000 km au-dessus de l'équateur. Encore une fois, c'est l'eau, les nuages, qui matérialisent les mouvements, des mouvements d'extrêmement grande amplitude qui embrassent la moitié d'un hémisphère. Par exemple un vaste courant y balaie l'Atlantique sud. En regardant de façon plus fine, on voit se superposer à ces grands courants, des structures météorologiques de taille plus modeste mais d'importance cruciale puisqu'ici il s'agit de cyclones, ou de tempêtes tropicales. A côté de ces grands mouvements, on voit aussi apparaître des structures dont la taille se mesure cette fois-ci non pas en milliers et dizaines de milliers de kilomètres, mais en centaines ou dizaines de kilomètres. Sur la **figure 4** on voit en effet toujours matérialisés par des nuages, des mouvements de beaucoup plus petite taille, de quelques dizaines de kilomètres. Ces figures font toucher du doigt les difficultés qu'il y a à traiter le mouvement atmosphérique dans toute sa complexité, c'est-à-dire de faire de la prévision : il faut à la fois prendre en compte des mouvements très localisés et décrire la façon dont ils interagissent avec les mouvements de taille immédiatement

supérieure ou immédiatement inférieure, et ceci sur toute la gamme des structures atmosphériques qui sont excitées. C'est ce qu'en d'autres termes on qualifie de turbulence, lorsque de multiples formes de mouvement sont possibles et que chaque forme de mouvement influence les autres. Faire de la prévision météorologique, essayer de faire de la prévision climatologique, c'est donc d'une façon ou d'une autre, essayer de trouver une solution approchée au problème de la turbulence.

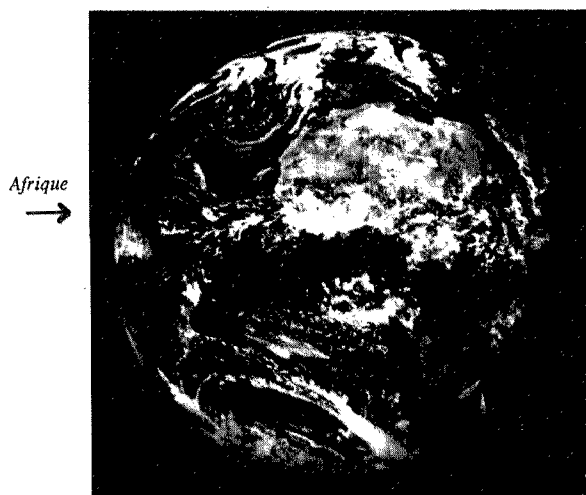


Figure 3
Les mouvements globaux de l'atmosphère tels que matérialisés par les nuages (cliché METEO-FRANCE, ASE)

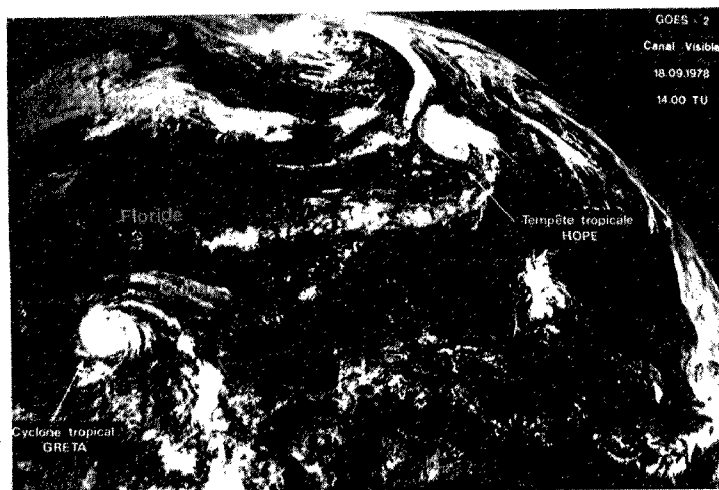


Figure 4
Quelques structures de mouvements particulières dans l'atmosphère : perturbations, tempêtes, cyclones

La prévisibilité

Il a déjà été dit plus haut que si l'on veut faire une prévision à un jour d'échéance, il faut s'intéresser à une zone d'influence de quelques centaines à un millier de kilomètres. La zone à considérer est de taille de plus en plus grande au fur et à mesure que l'échéance augmente. Il faut se convaincre que cette progression a une limite : on sait actuellement qu'au delà d'une certaine échéance on ne peut pas faire de prévisions déterministes (déterministe au sens «à telle échéance, il fera tel type de temps à tel endroit»). Au delà de cette échéance les différents mouvements qui cohabitent dans l'atmosphère auront en effet fini par interagir entre eux de telle façon que les plus petits mouvements, ceux pour lesquels il est pratiquement impossible d'obtenir une description exacte à un

moment donné, auront complètement contaminé l'évolution des plus grands. Ne connaissant pas avec exactitude ce qui se passait à l'instant initial, au moment où a commencé la prévision, on est certain de ne plus être capable de faire de prévisions déterministes au delà d'une date limite : cette limite se situe à environ quinze jours. Pour l'instant ceci reste un concept relativement théorique, puisque les techniques mises en oeuvre pour la prévision météorologique n'ont pas encore permis d'atteindre l'échéance théorique ultime. Cela permet pourtant de différencier, d'un côté, ce qu'on appelle «météorologie» jusqu'à ces échéances pour lesquelles on peut faire la prévision déterministe, et de l'autre côté, ce que l'on appellera «climat», inaccessible à l'approche déterministe et donc redevable d'une approche plus probabiliste, statistique.

Les modèles de prévision

Qu'est-ce qu'un modèle de prévision météorologique ? L'approche de Richardson est toujours globalement valable. Un modèle de prévision météorologique permet de décrire sur une grille, projetée sur le volume de l'atmosphère, les variables définissant l'atmosphère aux noeuds de ce réseau. Les lois de la physique de l'atmosphère sont "discrétisées" sur ce réseau et résolues numériquement grâce à l'ordinateur. Les réseaux actuellement utilisés définissent l'atmosphère par un ensemble de parallélépipèdes dont la taille horizontale est de quelques centaines de kilomètres et l'extension verticale de quelques centaines de mètres ou d'un tout petit nombre de kilomètres. Typiquement on a un "point d'atmosphère discrétisée" tous les trois cent kilomètres horizontalement, deux points étant distants verticalement d'environ cinq cent mètres. Les lois de la dynamique de l'atmosphère sont très complexes, et les interactions entre dynamique et thermodynamique rendent nécessaires la prise en compte de multiples échanges. La **figure 5** n'a d'autre intérêt que de montrer à quel point ces échanges sont complexes entre variables relatives aux nuages, c'est-à-dire à l'eau liquide dans l'atmosphère, variables relatives à l'humidité, c'est-à-dire à la vapeur d'eau, variable température et variable vitesse décrivant le vent. La résolution numérique correspondante des équations nécessite de connaître des variables d'entrée, conditions aux limites et conditions initiales : c'est ainsi qu'intervient par exemple la température de surface du globe et sa rugosité permettant de différencier les effets de l'océan et de la forêt, de faire intervenir le fait que le sol est enneigé ou pas ... parmi beaucoup d'autres possibilités (**figure 5**). Le

système actuellement en exploitation à Météo-France est un ensemble de deux modèles, l'un décrivant la totalité du globe, comme cela est nécessaire pour dépasser les échéances de quelques jours, et l'autre d'extension plus limitée permettant donc d'améliorer la finesse de description sur l'Europe et le proche Atlantique. Les pointillés de la figure 6 représentent les noeuds des grilles utilisées.

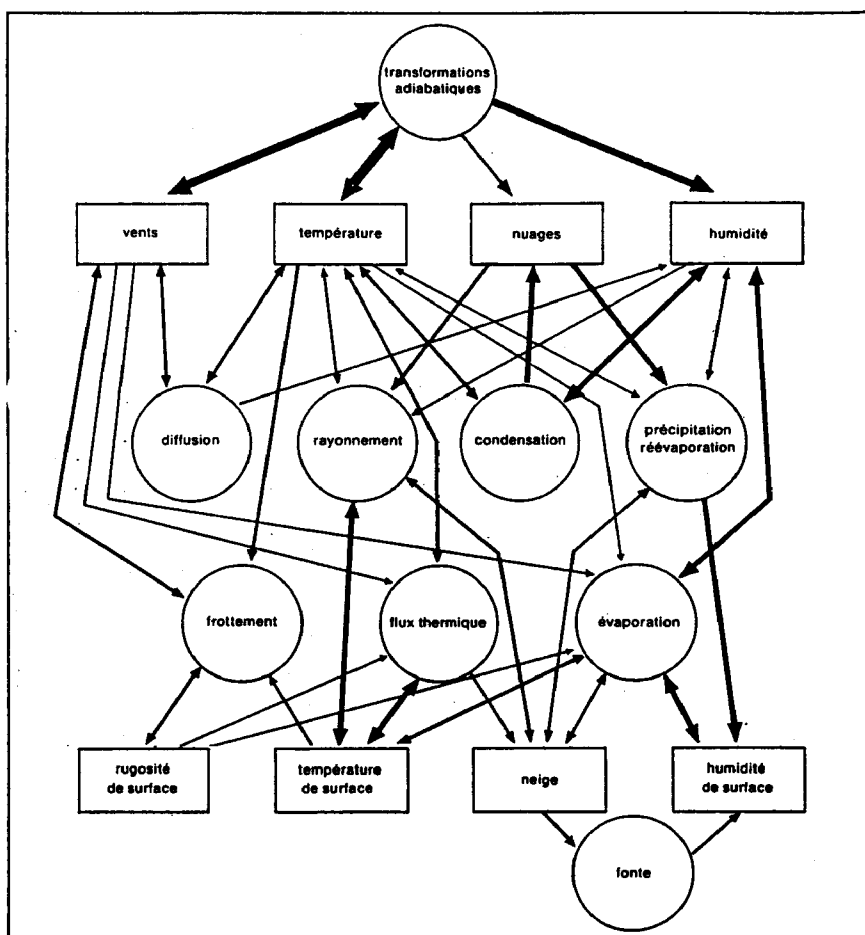


Figure 5
La complexité des phénomènes pris en compte dans un modèle météorologique (cliché CEPMMT)

La prévision aujourd'hui...

On sait actuellement faire des prévisions fiables ou raisonnablement fiables, à cinq jours d'échéance, c'est-à-dire avec une erreur inférieure à 20%. Ces prévisions sont diffusées à la radio et à la télévision en fin de semaine, et de façon plus régulière dans la presse écrite. Comment progresser à partir de là ? On progresse en fait sur de multiples fronts, en améliorant d'une part la description des

phénomènes qui interagissent pour piloter l'évolution de l'atmosphère, en augmentant d'autre part la puissance de calcul selon le vieux rêve de Richardson. On progresse en fait à un rythme qui est à peu près, à fiabilité de prévision égale, d'un jour d'échéance gagné tous les cinq ou six ans. Ceci est une moyenne de ce qui s'est passé au cours de la vingtaine d'années écoulées du à l'accumulation des progrès scientifiques et des moyens techniques. Actuellement à cinq jours d'échéance,

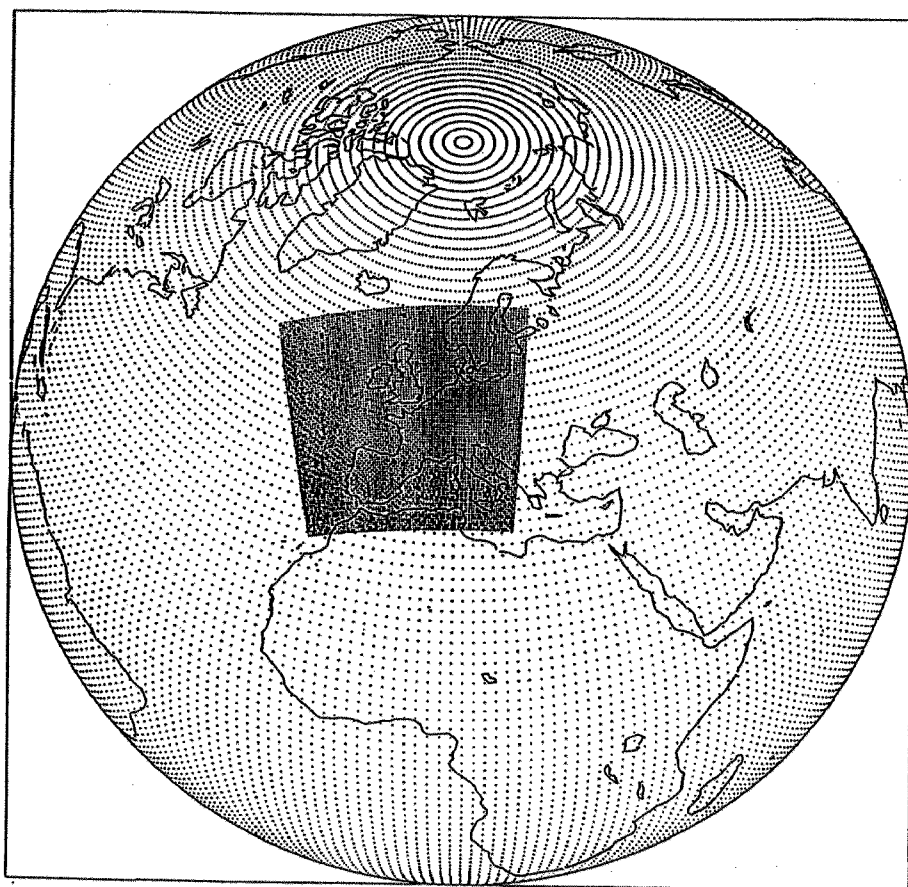


Figure 6

***Domaines et grilles des systèmes Emeraude (global) et Périidot (local)
pour les modèles de prévision de METEO-FRANCE***

on peut espérer atteindre dix jours d'échéance dans vingt ou trente ans, vers 2020 ? Quinze jours d'échéance, représente la limite au-delà de laquelle on ne pourra pas aller parce que l'on aura alors saturé toute possibilité de prévisibilité. Cette limite sera peut-être atteinte dans la deuxième moitié du XXIème siècle : si vous allumez votre télévision un soir de 2040, on vous y présentera peut être la prévision du temps pour les deux semaines à venir, mais certainement pas au-delà.

... et la prévision demain

Pour être plus spécifique, je voudrais donner brièvement trois exemples de phénomènes pour lesquels on a enregistré récemment, ou l'on pense pouvoir enregistrer prochainement des améliorations de la prévision allant vers une plus grande finesse de description. Pourquoi faut-il aller vers une plus grande finesse de description ? D'une part parce que cela répond à une demande du public, et d'autre part parce que très souvent les phénomènes les plus violents et les plus paroxystiques sont des phénomènes de faible extension spatiale. Pour aller du «plus simple au plus compliqué», d'aujourd'hui à demain et après-demain, il faut considérer à la fois ce que savent faire les météorologues opérationnels, au jour le jour, et ce que sont en train de préparer les chercheurs dans leur laboratoire.

Premier exemple : on se rappelle la tempête du 15 octobre 1987 qui a détruit une bonne partie de la Bretagne. Un centre de très basse pression (le 15 octobre à 18 h aux alentours de 960 hpa) a progressé vers le Nord-Ouest dans la nuit du 15 au 16 octobre en se creusant progressivement. On a vu à Brest la pression chuter très brutalement pour atteindre dans la nuit du jeudi 15 au vendredi 16, des valeurs inférieures à 950 hpa, en même temps qu'étaient enregistrés des vents extrêmement violents (voir figure 7). Des vents supérieurs à 140 km/h ont affecté la pointe de la Bretagne, qui a alors le plus souffert tandis que des vents supérieurs à 100 km/h étaient la règle sur tout l'ouest de la France. Un tel phénomène très violent, assez localisé, à développement rapide est-il prévisible, a-t-il été prévu, aurait-il pu être mieux prévu ? Divers modèles ayant des résolutions et des caractéristiques différentes, dont le modèle à moyenne échéance actuellement mis en oeuvre de façon coopérative par les services météorologiques européens, ont conduit à des prévisions de trajectoire du centre de basse pression en bon accord avec la réalité, même si l'intensité de la dépression n'a pas toujours été bien estimée. Ce phénomène, bien que très violent et relativement bien localisé, a été correctement prévu par METEO-FRANCE, donnant un bon exemple du savoir-faire actuel de la prévision météorologique. En France aucune perte de vie humaine n'a été à déplorer en mer, parce que les avis de tempête ont été diffusés à temps, et que les marins, habitués à écouter les prévisions, en ont tenu compte et sont rentrés au port.

Mais il y a des phénomènes plus délicats à décrire. **Le deuxième exemple**

concerne le violent orage qui s'est abattu sur Nîmes et a conduit à des inondations catastrophiques en octobre 1988. Des intensités de pluie atteignant 40 à 50 mm par heure, entre 4h du matin et midi ont conduit à des quantités (intégrées) totales de plus de 300 mm d'eau, voire dans un petit domaine de plus de 400 mm d'eau. La taille de ce petit domaine ne se mesurait pas en centaines de kilomètres, mais en kilomètres, au maximum. La prévision opérationnelle, au jour le jour, montrait une tendance à concentrer quelques pluies violentes sur le sud des Cévennes, mais aussi sur d'autres régions. Des avis de forts orages ont donc été émis, mais sans que cela ne donne lieu malheureusement, à des avis plus précis. Ce cas a été archivé pour servir de référence et tester de nouvelles méthodes améliorées de prévision. En modifiant la façon dont sont représentés les courants verticaux et les interactions entre les courants verticaux montants et les courants verticaux descendants, on arrive ainsi à reproduire une tendance stationnaire à de fortes pluies sur une région bien particulière située près de Nîmes. On conclue donc de cette étude que des phénomènes du type de celui qui a intéressé la ville de Nîmes et causé les dégâts que l'on connaît, sont des phénomènes que l'on est susceptible de décrire avec les systèmes de prévision actuels, convenablement améliorés toutefois par une meilleure prise en compte de processus physiques fins.

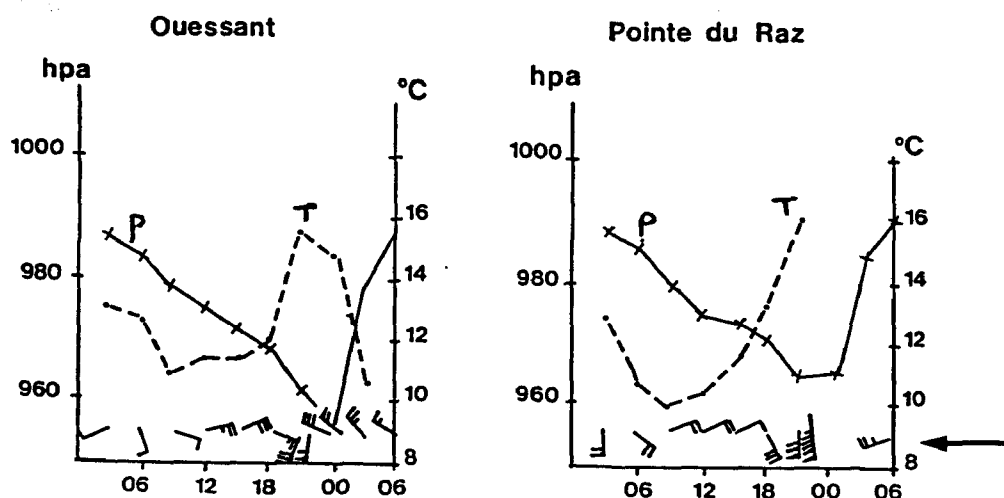


Figure 7
 La tempête du 15 octobre 1987 en Bretagne
 (T : température, P : pression barométrique)

Troisième exemple qui projette un peu plus loin dans le temps : la «ligne de grains» de la Pentecôte 1987. Le 7 juin 1987, une «ligne de grains», zone de

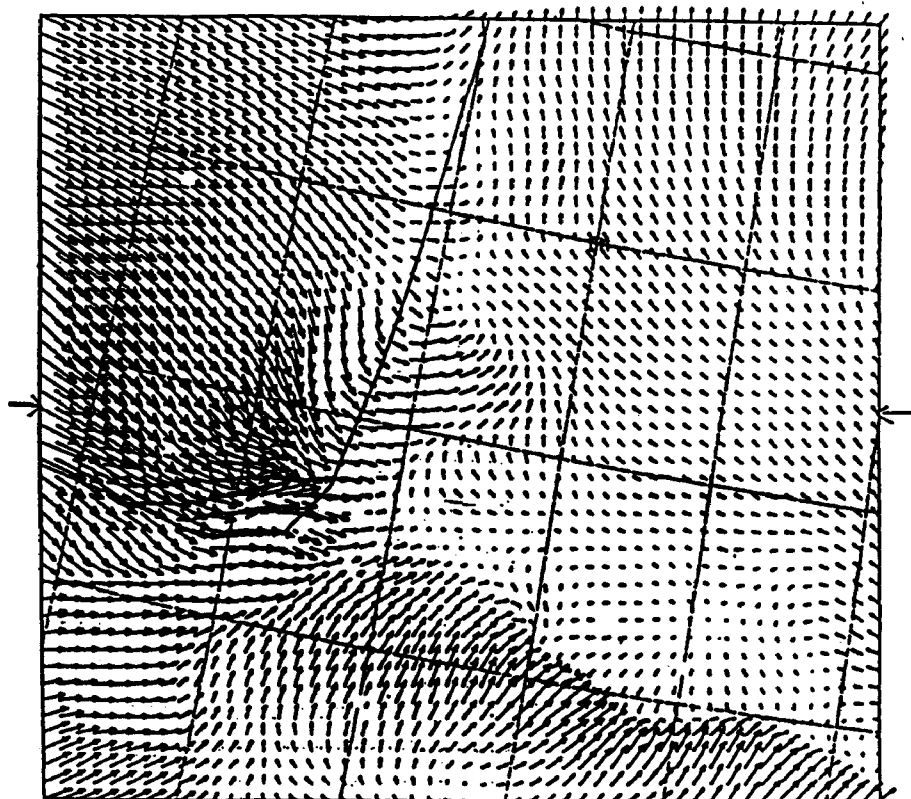


Figure 8
"non"-prévision de la ligne de grain du 7 juin 1987
(système opérationnel même avec maille plus fine)

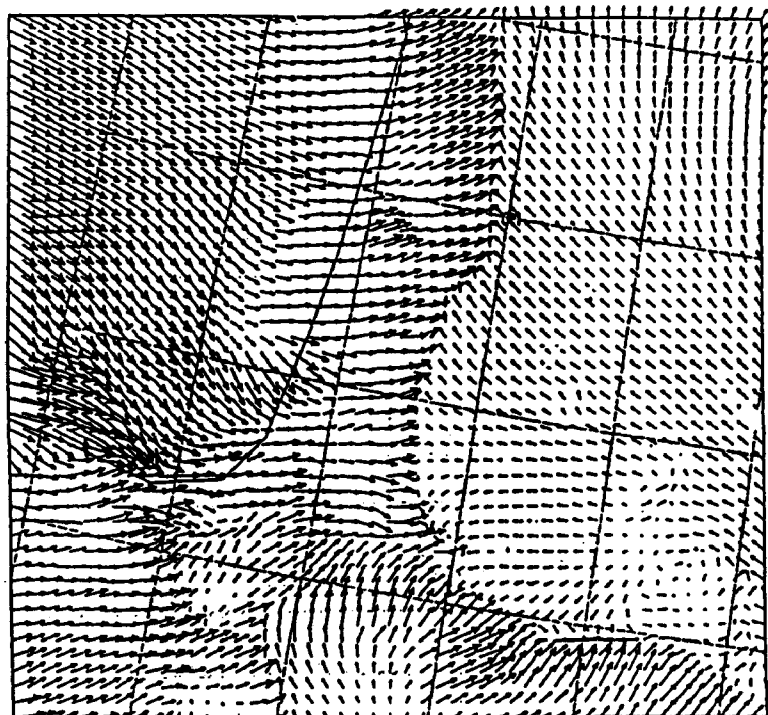


Figure 9
"post"-prévision de la ligne de grain du 7 juin 1987
(système avec maille fine et amélioration de la description des phénomènes correctifs)

très mauvais temps, a balayé tout le sud-ouest, du bassin d'Arcachon à la forêt des Landes, avec des vents extrêmement violents. Il y eu à déplorer des pertes en vies humaines puisque ce phénomène était passé inaperçu du système de prévision. Pourquoi n'a-t-il pas été prévu ? On peut d'abord penser que l'on n'avait pas une vision suffisamment bonne de ce qui se passait juste à l'Ouest, c'est-à-dire de l'endroit d'où est venu ce phénomène. La prévision (**figure 8**) ne permet pas en effet de reconnaître de phénomènes bien particuliers pour cette échéance. On a bien le sentiment qu'il se passe quelque chose d'important sur l'océan, mais rien de notable n'aborde l'intérieur des terres. Une prévision pour laquelle on aurait simplement multiplié la résolution spatiale par 4, c'est-à-dire le nombre de points par seize, n'aurait pas permis à elle seule d'atteindre les phénomènes. En fait, ce qui autorise, à posteriori, une bonne prévision est une conjonction entre des mailles plus fines, et donc un accroissement de la puissance de calcul. Il en résulte un progrès dans la description, par ce système de prévision, des interactions entre le cycle de l'eau et les orages d'une part et, d'autre part la façon dont l'eau s'évapore et refroidit l'atmosphère créant ainsi des courants d'air froid et lourd qui ont tendance à s'affaïsser et à créer de violentes rafales. Si on conjugue à la fois une résolution beaucoup plus fine et une description très soignée de ces mécanismes physiques qui règlent les échanges entre l'eau liquide et l'eau vapeur, on parvient à décrire tout à fait bien à ce qui a été observé, c'est-à-dire un fond de rafales très net, progressant et "balayant" tout le sud-ouest (**figure 9**).

Ce troisième exemple montre que pour arriver à une prévision d'éléments très violents, il faut à la fois attendre que les connaissances aient suffisamment progressé pour avoir pu apporter des améliorations sensibles aux modèles météorologiques et avoir une puissance de calcul suffisante pour, de façon routinière, pouvoir résoudre les phénomènes avec une dimension de maille beaucoup plus fine. Une amélioration de la résolution horizontale d'un facteur 4 dans chaque direction, conjuguée à une même amélioration de la résolution verticale rend les calculs 64 fois plus coûteux. Le critère CFL (critère de stabilité de calcul v.p. 32) qui relie la maille avec laquelle on décrit les phénomènes dans le temps, et la maille avec laquelle on les décrit dans l'espace, critère inconnu de Richardson, introduit un autre facteur 4. Ce facteur total de 256 requiert donc une augmentation de deux ordres de grandeur de la puissance des moyens de calcul. Le progrès technique fait gagner un ordre de grandeur en puissance informatique tous les cinq à dix ans. L'exemple de la **figure 9** est donc une préfiguration de ce que pourrait prévoir un système météorologique dans dix ou quinze ans.

Vers la prévision climatique

Que se passe-t-il au-delà de cette barrière qui limite les prévisions déterministes ? Est-il possible de «sauter de l'autre côté» et de faire de la prévision du climat, c'est-à-dire des phénomènes intéressant le mois, la saison, l'année, la décennie, le siècle...?

Si l'atmosphère devient complètement turbulente, totalement imprévisible, au bout d'une quinzaine de jours, on doit se poser la question de savoir quelle est la source de ses comportements à plus longue échéance. On sait en effet que peuvent exister des hivers chauds, ou froids et des étés secs ou humides. L'atmosphère, le climat, ont donc des comportements différenciés sur des échelles de temps longues. Ceci peu s'expliquer si l'atmosphère est en interaction avec un milieu qui évolue plus lentement et qui, évoluant plus lentement, va pendant un certain temps attirer l'atmosphère vers un certain état préférentiel. Un système qui de toute évidence évolue plus lentement que l'atmosphère, interagit avec elle et est donc capable de l'entraîner dans certaines directions, c'est l'océan. Comment se convaincre de cela ? Tout d'abord au niveau global et sur plus d'un siècle, de 1860 à nos jours, la température moyenne de l'air «suit» la température moyenne de surface de l'océan (voir **figure 10**). Cette relation temporelle existe aussi dans l'espace : si à un endroit de l'océan existe une zone chaude, plus d'énergie va être transmise à l'atmosphère qui la surmonte, et ceci pendant une ou deux semaines, un ou deux mois. D'une façon ou d'une autre, l'atmosphère sera influencée par cet apport préférentiel de chaleur à un endroit donné. Ces remarques sont à la base d'une méthode actuellement en train d'être exploitée, sur le mode de la recherche. On effectue plusieurs prévisions, parce qu'on sait très bien que des prévisions qui auraient été initiées avec des états légèrement différents, vont devenir totalement décorrelées l'une de l'autre au bout de 15 jours, au-delà de la limite de prévisibilité déterministe.

On effectue donc un certain nombre de prévisions sur 1,5 mois d'échéance, en conservant pendant la durée de la prévision l'état de l'océan tel qu'il est au moment où ont commencé les prévisions. Si pour les trente derniers jours de chacune des prévisions on retrouve des caractéristiques communes, celles-ci ne peuvent, de façon relativement facile à comprendre, avoir été induites que par les anomalies de température à la surface de l'océan. Les chercheurs aimant vivre dangereusement, je vous indique ici qu'une prévision de ce type, sortie le 27 novembre 1990 pour

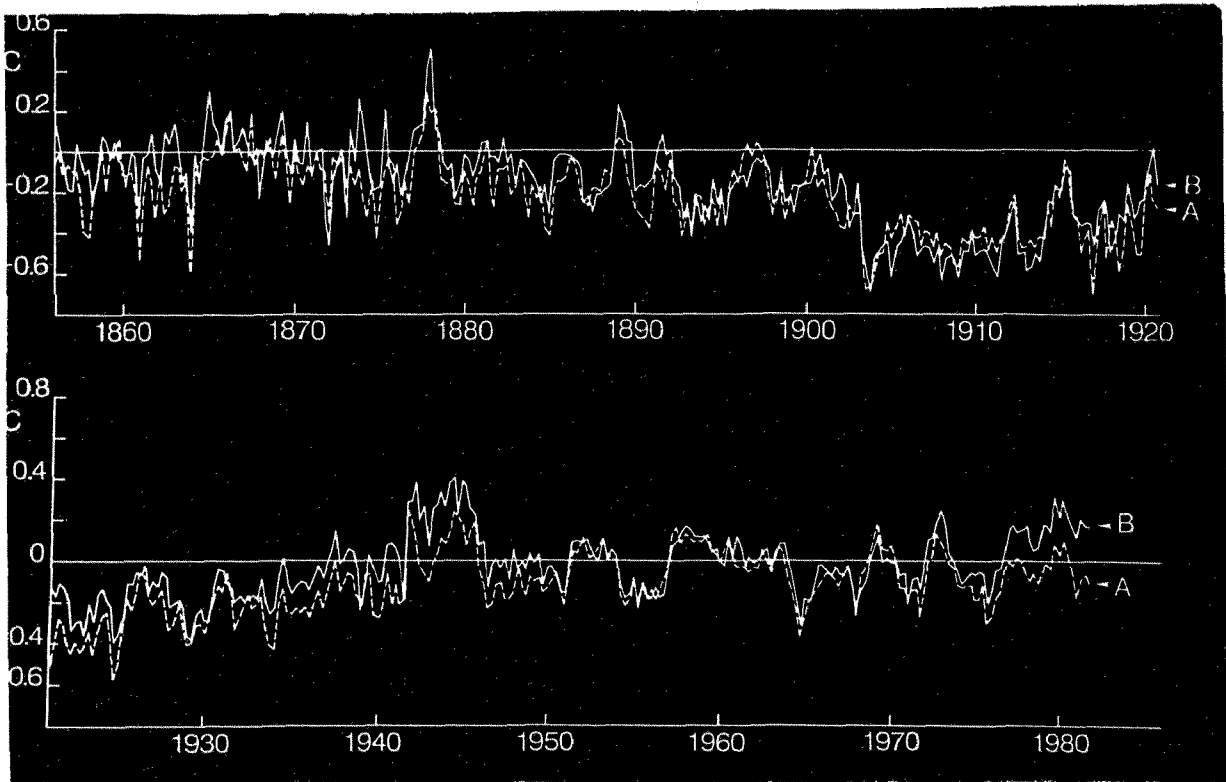


Figure 10
Evolution concomitante des fluctuations de la température moyenne de l'océan (trait pointillé) et de l'atmosphère (trait plein)

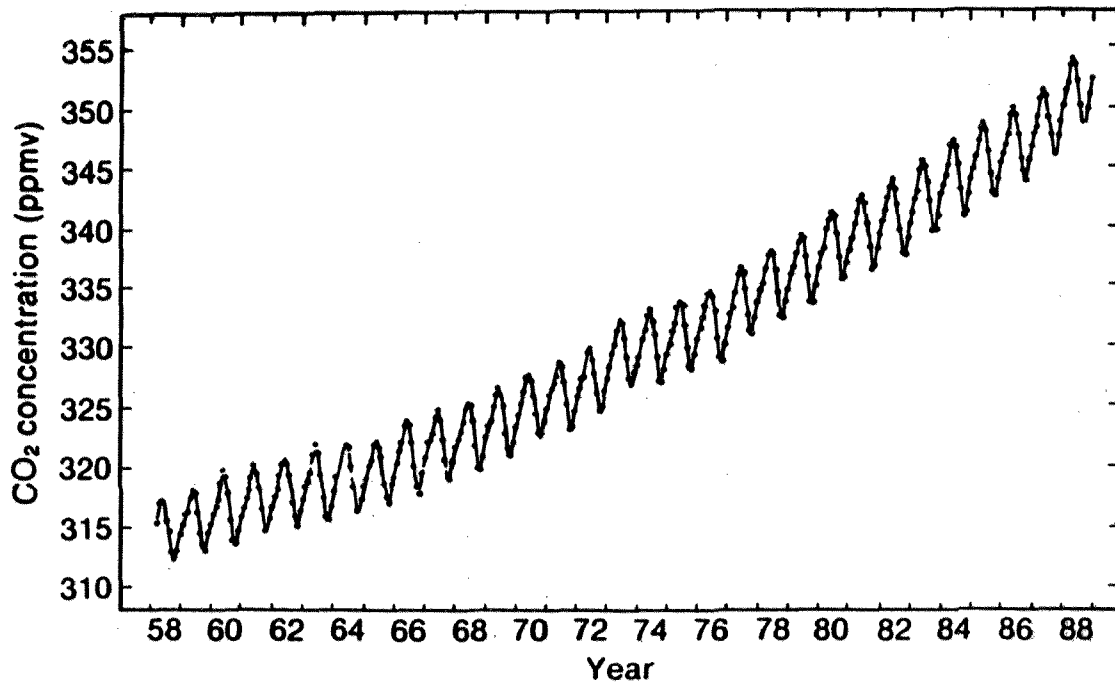


Figure 11
L'évolution de la quantité de gaz carbonique dans l'atmosphère

le mois de décembre indique que la température moyenne sur la France devrait être plus froide que la normale d'environ 2 degrés. Jusqu'à ce jour, l'effet annoncé semble correspondre à la réalité. Je ne dis pas qu'il faille immédiatement acheter pardessus et cache-cols !, mais cette prévision expérimentale donne une idée des produits qui sont en train d'être développés et qui, si les résultats de la recherche se confirment, pourront être distribués dans les années qui viennent. soit vers un public de professionnels, soit vers le grand public .

Quand la prévision océanique prend le pas sur la prévision atmosphérique

La méthode qui vient d'être décrite utilise l'hypothèse que pendant tout le temps où l'on fait évoluer la température de l'atmosphère, la température de l'océan reste constante. Il est toutefois bien évident que même si l'océan évolue beaucoup plus lentement que l'atmosphère, il évolue quand même et que l'on ne peut pas décrire toutes les échéances climatiques avec un système à «océan figé». Il faut alors se projeter un peu plus en avant et décrire non seulement la façon dont l'atmosphère s'adapte à l'océan mais aussi la façon dont l'atmosphère et l'océan interagissent, dont l'océan lui-même évolue. On se retrouve ainsi confronté au problème, non plus de la prévision météorologique, mais de la prévision océanique. Si l'on sait prévoir l'état de l'océan sachant de plus que l'océan évolue beaucoup plus lentement que l'atmosphère, on pourra à chaque pas d'évolution de l'océan adapter un état de l'atmosphère, c'est-à-dire définir le climat atmosphérique correspondant. Ce pari peut paraître très audacieux, mais il n'est pas complètement utopique pour autant. On peut actuellement reproduire avec des modèles océaniques, qui sont en quelque sorte des préfigurations pour l'océan des modèles météorologiques pour l'atmosphère, avec un certain degré de réalisme et structures océaniques que l'on sait mesurer in-situ ou observer depuis l'espace. C'est sur ces premières études qu'il faut se fonder pour travailler au développement des modèles de prévision océano-climatiques.

Le climat du siècle prochain

Ce genre d'étude est en effet nécessaire si l'humanité veut faire face au défi de prévoir ce que sera le climat modifié par l'augmentation de l'effet de serre. Le gaz carbonique qui est dégagé par suite de l'utilisation des combustibles fossiles a consi-

dérablement augmenté dans l'atmosphère depuis les années 1950 (figure 11). La courbe montre certes des fluctuations entre l'été et l'hiver dues au cycle de la végétation, mais l'augmentation de la quantité de gaz carbonique est très inquiétante. Celui-ci va en effet "emprisonner" un peu plus la chaleur autour de la planète, va provoquer le développement de systèmes nuageux, qui eux-mêmes vont contribuer à augmenter cet effet de serre dans des proportions qui sont encore sujettes à débat. Comme une partie de ce gaz carbonique et du réchauffement résultant passent dans l'océan, il est absolument crucial de disposer de modèles météo-océaniques pour tenter de prévoir la façon dont cette augmentation du gaz carbonique lié aux activités humaines va pouvoir influencer l'avenir climatique de la planète. On n'imagine pour l'instant cet avenir climatique qu'en figeant l'océan. On peut estimer à partir de trois modèles atmosphériques différents, la variation prévisible de la température, par rapport à la température actuelle, lorsque la quantité de gaz carbonique équivalente aura doublé. Dans de nombreuses régions la température risque d'augmenter de plus de 4 degrés. Il y a convergence entre ces trois études sur le fait que probablement les hautes et moyennes latitudes subiront le plus fort réchauffement, dans l'hémisphère nord comme dans l'hémisphère sud, alors que les latitudes équatoriales et tropicales seront moins affectées. Cette vision "brute" du climat du siècle prochain n'inclue pas la réaction de l'océan qui va lui-même absorber une partie de cette chaleur et la redistribuer d'une façon différente que l'on ne sait pas actuellement appréhender. Il est donc essentiel de mettre en place une description évolutive qui inclue à la fois l'océan et l'atmosphère. Si l'on essaie d'être le "Richardson" des années 90, et de prévoir dans quelles conditions il est possible d'y arriver, il faut faire des paris sur la puissance informatique disponible. Actuellement, avec les calculateurs les plus puissants, il faut mille heures de temps machine pour simuler dix ans de climat. Avec un modèle d'océan encore rudimentaire il faudrait donc à l'heure actuelle utiliser l'ordinateur sans discontinuer pendant un an pour se projeter à la fin du XXIème siècle !

On sait par ailleurs qu'il faudra probablement recourir à des résolutions dix fois plus fines dans l'atmosphère et dans l'océan pour atteindre à la finesse de résolution nécessaire. Avec le facteur temps qui intervient lui aussi (rappelons-nous le critère CFL et les déboires de Richardson) il faudra donc disposer d'ordinateurs dix mille fois plus puissants pour atteindre l'objectif. Si les constructeurs d'ordinateur continuent, tous les cinq à dix ans, à gagner un facteur dix sur la puissance des machines, il faudra donc attendre vingt ans et quarante ans. C'est donc vers 2020 que l'on sera capable de faire une bonne prévision du climat pour le siècle à venir .

Au rythme où l'évolution climatique risque de se faire, il est possible qu'à ce moment là on dispose de la preuve expérimentale de l'évolution au moment où l'on commencera à pouvoir la prévoir de façon raisonnablement fiable...

En guise de conclusion

L'homme est actuellement face à une expérience climatique tout à fait involontaire : sans qu'il comprenne vraiment comment cela va ultimement se passer, il est pourtant en train de réussir ce qu'il a cherché à faire depuis la nuit des temps, c'est-à-dire à modifier le temps. Les archers tiraient sur les orages pour faire pleuvoir ou pour détourner la pluie (figure 13). Jusqu'à présent toute action volontaire de modification du temps pouvait avoir un résultat positif ou négatif, une action dans un sens ou son contraire, et le plus souvent aucune influence L'homme malgré cela a toujours espéré qu'il serait capable de contrôler le temps.

Jean-Claude ANDRE
METEO-FRANCE
Etablissement d'Etudes et de
Recherches Météorologiques (Toulouse)



Gravure du xvii^e siècle représentant une technique pour détourner les orages...