Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Band: 81 (1992)
Heft: 1

Artikel: Deux siècles de météorologie
Autor: Sesiano, Jean
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-279871

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 11.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat. 81, 1992: 299-310. ISSN 0037-9603

Deux siècles de météorologie

par

Jean SESIANO[1]

Abstract.–SESIANO J., 1992. Two Centuries of Meteorology. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat. 81*: 299-310.
At the end of the 18th century, it became obvious that a two-days meteorological forecast was a necessity. It would be beneficial to the agriculture, festivals, the fishing industry, and the war machine. Weather stations were numerous, but the gathering of observations was desperately slow. In 1832, the discovery of the telegraph unstuck the situation.

At the turn of the century, regular measurements were made on the ground as well as at high altitudes, on the continents and over the oceans, though more scarcely in the Southern hemisphere. Around 1940, the computer development led to more elaborate atmospheric models, using the tide of data coming from an ever increasing number of weather stations: airplanes, ships, buoys, sounding-balloons, automatic stations and men. Meteorological satellites must also be mentioned, but their role has a tendency to be overestimated.

Nowadays, top-level computers allow international weather centers (Reading, near London, for Europe) up to 8-days forecasts, with a 85% fiability for 2 days, and 60% for 6 days. But, we should not be overconfident: a long term weather forecast (one month) is still utopic.

Keywords: Meteorology; Meteorology history and development; Swiss Meteorology.

Résumé.–SESIANO J., 1992. Deux siècles de météorologie. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat. 81*: 299-310.
Dès la fin du XVIIIe siècle, la nécessité de faire une prévision météorologique à deux jours, voire plus, s'impose: les récoltes, les fêtes, la pêche, la guerre, etc. l'exigeaient. Les stations d'observation se multiplient, mais le rassemblement des données est lent. En 1832, l'invention du télégraphe débloque la situation. Dès la fin du XIXe siècle, les prévisions deviennent routine et les moyens d'observation s'étendent: du sol à la haute atmosphère, des continents aux océans, avec cependant toujours une carence, encore actuelle, au niveau de l'hémisphère sud. Vers le milieu du XXe siècle, c'est à nouveau

[1]*Département de Minéralogie, rue des Maraîchers 13, CH-1211 Genève 4.*

CODEN: BSVAA6 *© Société Vaudoise des Sciences Naturelles - Droits de reproduction réservés*

une invention technologique qui permet de briser le plafond auquel on se heurtait depuis quelques décennies: le développement de l'ordinateur. Les modèles de l'atmosphère deviennent plus élaborés avec la prise en compte des phénomènes météorologiques au sol et en altitude, à de nombreux niveaux, et sur l'ensemble du Globe. L'avalanche d'observations qui déferle est alors la bienvenue. Actuellement, si le satellite météorologique joue un rôle important, médiatique surtout, il ne faut pas le surestimer; la majeure partie des observations est encore le fruit de moyens tradition-nels: l'avion, le bateau, les bouées, les ballons-sondes, les stations automatiques, et surtout l'homme.

Le résultat est satisfaisant: la prévision à deux jours est exacte dans 85% des cas, et celle à six jours, dans 60%. Mais il ne faut pas se leurrer: la prévision à long terme (un mois) est encore totalement utopique.

1. Introduction

Dans le premier volume du Bulletin des séances de la Société vaudoise des Sciences naturelles, publié en 1845, on trouve de nombreuses observations scientifiques, et notamment des mesures concernant la météorologie. Elles ont été effectuées par E. Wartmann (1842a, 1842b, 1842c, par exemple), au cabinet de Physique de l'Académie de Lausanne, et consistent en des relevés des paramètres habituels, soit la pression, la température, l'humidité, la vitesse du vent et l'état du ciel, avec en plus quelques observations générales. Un exemple d'un tel tableau est donné à la figure 1. Chose curieuse, ces tableaux de mesures ne concernent que les solstices et les équinoxes, et cela dès décembre 1841, pour 18 heures précédant et suivant le phénomène astronomique.

En plus de ces observations régulières, on prend connaissance, toujours dans le même numéro, de quelques articles de fond sur des phénomènes particuliers: des hausses et des baisses de pression ayant frappé l'auteur de l'article, E. Wartmann (*op. cit.*), par leur régularité (par exemple à la fin de 1841 et au début de 1842); l'approche d'un orage venant de Genève et se déplaçant sur le Léman (par R. Blanchet, 19 juin 1843); la recherche par le même E. Wartmann (1842d) d'une éventuelle relation entre les observations météorologiques et l'éclipse de soleil du 8 juillet 1842 (elle s'est avérée inexistante), et finalement l'observation par J. De la Harpe (1845) «*d'un arc-en-ciel blanc dans le brouillard*» (sic). D'autre part, on trouve des comptes rendus d'expériences ou d'observations, encore liées à la météorologie, mais moins directement: le 7 décembre 1842, le professeur Gilliéron parle de son mémoire intitulé «*L'arc-en-ciel et les globules colorés*», ces derniers étant les gouttelettes adhérentes aux feuilles, tiges et autres parties végétales, et susceptibles de présenter de belles irisations par temps ensoleillé (Gilliéron 1843a). Le même personnage récidive le 14 juin 1843, mais cette fois-ci sur «*Les émanations atmosphériques qui affectent puissamment les organes des plantes et des animaux*» (Gilliéron 1843b). Est particulièrement prise à partie la vaudaire, vent du SE, dont le nom viendrait du patois «vaudai», signifiant sorcier (selon Gilliéron). Elle aurait des influences fâcheuses sur la végétation car, «*venant de Syrie et d'Arabie en longeant la Méditerranée et l'Adriatique*» (sic), ou originaire même d'Afrique, puis passant le Simplon ou le Saint-Bernard, elle se serait chargée en passant sur les zones marécageuses du Pô de tous les miasmes malfaisants affectant ces régions deltaïques, au drainage hésitant ! Et si l'analyse chimique n'a rien pu mettre en évidence, c'est peut-être à cause de la «*prodigieuse divisibilité des odeurs*». Et Gilliéron de

Du 21 Décembre, à 6 heures du matin.

heures.	barom. à 0°.	therm. extér.	hygr.	vents.	état du ciel.	observations.
6	703 167	+ 1° 68	100°	N	neige	pluie et neige toute la nuit.
7	703 616	2 24	99	N	pluie	calme.
8	704 163	2 28	98	N	éclaircies	calme.
9	705 354	3 20	97	S	brouillard	très-calme ; percée de soleil.
10	706 401	3 60	97	N	couvert	calme.
11	706 739	4 00	98	NE	brouillard	percées de soleil.
12	706 981	5 00	95	N	couvert	calme.
1	707 094	5 60	91	N	soleil	calme.
2	707 094	5 96	91	N	éclaircies	calme.
3	707 545	5 72	92	N	éclaircies	calme.
4	708 016	5 04	92	N	brume	calme ; magnifique coucher.
5	708 432	3 94	95	—	couvert	calme.
6	709 261	5 40	93	—	couvert	calme.
7	709 715	4 64	94	—	couvert	calme.
8	710 016	4 58	93	—	éclaircies	calme.
9	710 300	3 68	94	—	éclaircies	calme.
10	710 574	4 00	95	—	éclaircies	calme.
11	710 784	4 16	97	—	éclaircies	calme.
12	710 784	4 36	98	—	couvert	calme.

Du 22 Décembre, à 1 heure du matin.

heures.	barom. à 0°.	therm. extér.	hygr.	vents.	état du ciel.	observations.
1	710 784	4° 44	98°	—	couvert	calme.
2	711 026	4 40	99	—	couvert	calme.
3	711 010	4 60	98	—	couvert	calme.
4	711 010	4 64	98	—	couvert	calme.
5	711 062	4 40	100	—	couvert	calme.
6	711 146	4 60	95	—	couvert	calme.
7	711 370	4 00	98	N	couvert	calme.
8	711 662	4 82	93	N	soleil	calme, brum. sur le lac.
9	712 256	5 10	93	N	soleil	idem idem
10	712 449	5 44	93	N	soleil	idem idem
11	712 433	6 08	92	S	soleil	idem idem
12	712 362	6 40	92	S	couvert	idem idem
1	712 570	6 62	91	N	couvert	idem idem
2	712 715	6 60	89	N	couvert	calme, brume.
3	713 060	6 22	89	N	éclaircies	calme, brume.
4	713 883	6 42	91	N	soleil	calme, beau coucher, quelq. nuages.
5	714 044	5 40	90	—	éclaircies	calme.
6	714 269	5 24	88	—	éclaircies	calme.

Figure 1.–Un des tableaux des observations météorologiques publié dans le premier numéro du *Bulletin des séances de la Société vaudoise des Sciences naturelles* (WARTMANN 1842b).

conclure que pour étudier ce cadeau empoisonné qu'est la vaudaire, il faudrait faire des observations comparées avec Milan et Venise. Au vu de ce dernier article, on se rend compte que dans ces comptes rendus, il y a *«à prendre et à laisser»*, certains cadrant parfaitement bien avec les idées actuelles que l'on a de la météorologie, et d'autres, ayant moins bien vieilli, n'étant plus que d'amusantes anecdotes.

En résumé, on trouve dans ce premier volume des observations météorologiques données à des dates bien précises (solstices et équinoxes), mais effectuées de toute façon quotidiennement, ainsi que des articles de fond, de niveaux très variables.

Cette préoccupation des observateurs d'il y a 150 ans, est toujours la même que ceux de notre époque. La météorologie est encore une science d'observation, même si l'automation y a fait une entrée en force, et elle est accompagnée d'interprétations où l'erreur personnelle a encore droit de cité.

2. Les préoccupations météorologiques de l'époque

Dès la fin du XVIIIe siècle, on s'était rendu compte avec toujours plus d'acuité de l'importance des observations simultanées effectuées en des endroits très variés; il devenait en fait nécessaire de construire des cartes météorologiques synoptiques, c'est-à-dire établies pour une région donnée à un instant précis. Il était clair cependant que même si l'ambition était, pour ce faire, de couvrir de stations l'Europe, voire le monde entier, ce dernier n'avait pas l'extension que nous lui connaissons. Il s'agissait, à part le Vieux-Monde, de quelques stations en Russie, au Grœnland et en Amérique du nord. Et c'est le célèbre chimiste Lavoisier qui était la cheville ouvrière de ce mouvement, lui qui espérait ainsi faire des prévisions à deux jours, basées sur ce réseau d'observations, avec émission journalière d'un bulletin météorologique (Viaut 1973). On voit que ses espoirs n'étaient pas très éloignés de ceux qui étaient les nôtres, il n'y a encore que quelques décennies. Cependant, c'est à l'absence d'un moyen de transmission rapide que l'on doit la non concrétisation de ses projets.

En plus de ces stations, dont les observations étaient régulièrement publiées dans les revues de sociétés savantes, de nombreuses personnes effectuaient leurs propres mesures, à l'instar de celles auxquelles nous faisions allusion dans le chapitre précédent. Si un tel engouement s'était ainsi brusquement manifesté de par le monde pour la chose météorologique, c'est qu'il y avait une forte demande de prévisions: de la part de la population qui s'était très vite rendu compte des avantages de pouvoir connaître le temps à l'avance (pour les récoltes, les marchés, les fêtes, les spectacles, les corvées journalières, etc.); de la part des marins d'eau douce et des gens de la mer, pour qui l'aléa du gros temps, à bord de leurs esquifs frêles ou massifs, était toujours présent à l'esprit, que cela soit pour la pêche, le cabotage ou la traversée au long cours; enfin, pour la machine militaire, envers qui le temps pouvait être un précieux allié ou le plus sournois des ennemis.

A l'aube de la Restauration, la frustration des météorologues était patente (Hardy *et al.* 1982); les observations affluaient de très nombreuses stations terrestres et même des divers océans, mais avec un retard dans le temps proportionnel à leur éloignement. La carte synoptique, dont on sentait

l'urgence, après en avoir finalement compris l'importance, était toujours aussi utopique. Prévoir le temps un à deux jours à l'avance tenait toujours de la gageure.

Mais une invention remarquable, tant sur le plan de l'emploi que sur celui de la simplicité, vint révolutionner la situation. En 1832, S. Morse invente le télégraphe. Quelques années plus tard, les communications rapides étaient nées. Leur application à la science du temps fut foudroyante. Par un juste retour des choses, ce furent l'Angleterre et les Etats-Unis, patrie de l'inventeur, qui furent les premiers à engranger les fruits de cette découverte. C'est ainsi que la *Smithsonian Institution* établit en 1847 le premier réseau de stations météorologiques. Une collaboration similaire s'instaura en Grande-Bretagne, une carte synoptique à 9 h y étant publiée chaque jour (HARDY *et al. loc. cit.*). L'impulsion étant donnée dans les pays anglo-saxons, rien ne devait plus l'arrêter.

Durant ce temps, sur le continent, la France n'était pas restée inactive. Mais c'est surtout la catastrophe essuyée par la flotte franco-anglaise, alors en guerre contre la Russie, au large de Balaklava en Crimée, drame dû non à l'ennemi, mais à une tempête, qui joua le rôle de détonateur. Le Verrier, alors directeur de l'Observatoire de Paris, put prouver à l'aide des observations météorologiques faites de par l'Europe, que cette tempête s'était déplacée d'ouest en est, et qu'elle aurait été donc parfaitement prévisible par un service météorologique national (VIAUT *loc. cit.*). Ce fut la naissance d'un bulletin régulier.

Les Anglais de leur côté progressaient. Dès 1861, un bulletin quotidien paraissait, ainsi qu'une prévision à trois jours (HARDY *et al. loc. cit.*). Rappelons pour mémoire que ce type de prévision prévalait dans notre pays il y a encore une dizaine d'années, mais avec une fiabilité sans doute meilleure !

3. LA MÉTÉOROLOGIE À LA BELLE ÉPOQUE

A l'orée de notre siècle, le graphisme des cartes synoptiques était assez semblable à celui que nous connaissons. Les isobares, ou lignes d'égale pression, avaient vu le jour depuis plusieurs décennies. L'importance des variations de la pression au cours des trois heures précédant la mesure, avait également été perçue, et les zones concernées étaient toujours portées sur les cartes. La structure verticale de l'atmosphère au-dessus d'une région donnée avait, elle aussi, été appréhendée: des sondages par ballons et cerfs-volants avaient régulièrement lieu, les mesures des paramètres météorologiques mesurés durant l'ascension étant transmises par radio au sol. La zone dans laquelle se déroule le temps qu'il fait, la troposphère, entre le sol et environ 10 à 12 km (aux latitudes moyennes), avait été définie si ce n'est étudiée, ainsi que la stratosphère qui la surmonte, jusqu'à 50 km environ.

A cette époque également, on commençait à s'intéresser à la prévision à long terme, c'est-à-dire sur plusieurs semaines, voire une saison. Les scientifiques de l'époque étaient pourtant loin de se douter que près d'un siècle plus tard, le problème serait toujours loin d'être résolu ! Ce soudain regain d'intérêt pour l'échéance lointaine avait été déclenché par une grave famine qui toucha l'Inde en 1887, consécutive à une mousson très avare en

précipitations. On tenta de trouver des corrélations entre les épaisseurs de neige tombées sur l'Himalaya et l'intensité de la mousson (HARDY *et al. loc. cit.*). Cela peut paraître étonnant lorsque l'on sait que c'est le même flux humide qui déverse son eau sur l'Inde, puis sur les pentes méridionales de la chaîne. Il va sans dire que ces recherches ne furent pas couronnées de succès, car d'autres catastrophes naturelles liées à la sécheresse se sont répétées depuis.

Au tournant du siècle, un autre concept avait aussi pris corps: celui de l'existence sur le Globe de zones de hautes et basses pressions semi-permanentes. Il suffit de penser aux régions polaires et subtropicales, dont l'aridité va de pair avec des températures extrêmes (les ceintures désertiques attestent de ce phénomène), ainsi qu'aux régions très fortement arrosées, comme les régions équatoriales et le nord de l'Europe, l'Angleterre et la Scandinavie par exemple (bien que Londres reçoive annuellement en moyenne moins de précipitations que Lausanne !). On se rendit compte que ces centres d'action relativement stables devaient avoir un rôle important à jouer pour les prévisions à longue échéance. C'est l'école allemande qui, durant la période suivant la première guerre mondiale, tenta de résoudre le problème de la corrélation entre la trajectoire des dépressions sur l'Atlantique et la position des anticyclones polaires et subtropicaux.

Quant à la Russie, son approche avait été différente. Il s'agissait d'une méthode statistique appliquée aux cartes synoptiques, ou si l'on veut: à des situations actuelles similaires à des situations passées, devront correspondre des conditions météorologiques semblables. Il est vrai que pour des pays comme la Russie, dont la continentalité n'est plus à démontrer, cette approche est plus gratifiante que pour l'Europe occidentale, dont l'emplacement, à la limite entre deux mondes très différents, l'un océanique et l'autre continental, complique singulièrement le problème.

4. LES TEMPS MODERNES

On assiste à un développement explosif de l'aviation, génératrice d'observations, mais aussi grande consommatrice de prévisions. C'est ainsi que peu après la seconde guerre mondiale, c'est à nouveau une limite technologique qui vient entraver l'évolution de la météorologie. Un siècle plus tôt, le télégraphe avait résolu le problème de la transmission des données destinées à l'établissement de cartes synoptiques; cette fois, c'est la mise au point des gros ordinateurs qui allait débloquer la situation en permettant d'assimiler l'avalanche de données qui commençait à déferler. En effet, le nombre de stations météorologiques ne cessait de croître de par le monde.

Lorsque des lieux étaient par trop inhospitaliers, en zones désertiques, polaires ou de hautes montagnes, des stations automatiques étaient installées, envoyant par radio à intervalles fixes, tout un cortège d'informations. Mais surtout, on s'était rendu compte avec toujours plus d'acuité qu'environ 70% de la surface du Globe était «*terra incognita*» en ce qui concerne la météorologie. Il s'agit bien entendu des surfaces marines et océaniques, groupées du reste dans l'hémisphère sud principalement. Il est vrai qu'on recevait de ces régions des informations diffusées par des avions, des navires

de ligne et des cargos, ainsi que par des bateaux fixes, bien qu'en très petit nombre. Mais ce n'étaient que des données ponctuelles. Et pourtant, l'interaction entre les océans d'une part, et les continents et l'atmosphère d'autre part, est déterminante. Il suffit de songer qu'une grande partie de l'excès d'énergie reçue à l'équateur est évacuée vers les pôles par les courants marins chauds (le Gulf Stream étant un exemple-type), avec retour d'eaux froides superficielles et profondes des pôles vers l'équateur (le courant de Humboldt, par exemple, au large des côtes sud-américaines). Non seulement il y a échange d'énergie entre les continents et les océans, mais aussi entre l'atmosphère et les continents: un exemple est donné par la chaleur de vaporisation, énergie mise en jeu lorsque de l'eau de surface s'évapore dans la masse d'air qui la surmonte, en quantité variable selon ses propriétés de température, de pression et d'humidité, ou encore par les courants convectifs permettant l'échauffement sur toute la hauteur de la troposphère.

Pour pallier les carences mentionnées ci-dessus, ce furent d'abord les satellites artificiels dits météorologiques qui vinrent à la rescousse, et cela de deux manières. Soit en étant utilisés comme stations-relais destinées à récupérer des mesures envoyées depuis le sol par des stations automatiques, puis à les délivrer un moment plus tard à des centres-récepteurs, soit en photographiant le sol dans diverses longueurs d'onde (visible, IR), à partir d'orbites basses, avec transmission par radio des photos point par point. L'évolution technique se poursuivant, les satellites, dès lors géostationnaires, furent bientôt chargés de faire eux-mêmes les mesures, de jour et de nuit: c'est ainsi que purent être et sont actuellement mesurées et observées la température de surface des océans ainsi que celle à diverses altitudes dans l'atmosphère (par IR), l'humidité, la vitesse des vents (par l'état de surface de la mer et le déplacement des nuages), la proportion des gaz-traces (ozone, oxydes de soufre et d'azote, gaz carbonique, etc.), les différentes masses d'air (selon les types de nuages), etc. De plus, des photos sont prises toutes les 30 minutes, permettant de suivre l'évolution du temps.

Pour la première fois, l'atmosphère et les océans commençaient à se dévoiler; ce n'était plus un début de connaissance hémisphérique (boréale surtout) que l'on avait, mais une acquisition à l'échelle globale. La modélisation pouvait commencer.

Il faut en effet savoir qu'une prévision fiable à 36 h, pour la Suisse par exemple, nécessite des informations météorologiques provenant de l'Europe et de tout l'Atlantique nord. Pour une prévision à plus de quatre jours, c'est le Globe entier qui est concerné. On voit que la quantité d'informations à traiter devient colossale: un réseau de stations aussi dense que possible sur toute la Terre, fournissant simultanément quatre fois par jour (0-6-12-18 h GMT) les valeurs des paramètres caractéristiques de l'état de l'atmosphère; des mesures régulières ou irrégulières fournies par les avions, les bateaux, les bouées fixes ou en dérive; les informations des ballons-sondes envoyés une ou deux fois par jour de divers centres météorologiques; finalement, les données des satellites météorologiques. La tâche devenait surhumaine pour un pays.

C'est ainsi que naquirent les grands centres continentaux de prévision, dotés d'ordinateurs à très forte capacité. En ce qui concerne notre continent, c'est de Reading près de Londres, siège du centre européen depuis 1973, que nous obtenons nos prévisions à moyenne échéance (huit jours). Elles sont modulées par chaque centre national (Zurich, Genève et Locarno, pour la

Suisse), ce qui n'empêche pas chaque état de faire tourner son propre modèle météorologique (modèle allemand, modèle français, etc.) (QUIBY *et al.* 1988).

Comme on vient de le voir, l'ordinateur doit être capable d'ingérer un nombre faramineux d'informations, et on va mettre huit heures à rassembler toutes ces mesures. Pour simuler l'évolution de l'atmosphère, on va la diviser en un certain nombre de niveaux, 31 entre le sol et l'altitude de 25 km; la troposphère, c'est-à-dire la zone du temps qu'il fait (chez nous épaisse d'environ 11 km, mais de 7 km dans les régions polaires et de 17 km à l'équateur), y est totalement inclue, et on déborde donc sur la stratosphère. Au sein de ces niveaux, on va définir une grille horizontale gaussienne d'une résolution de 0,69°. Ainsi, la résolution spatiale du modèle, soit sa capacité à repérer le plus petit phénomène météorologique, sera de 100 km. On obtient finalement un réseau en trois dimensions comportant plus d'un million de points. En chacun de ces nœuds de maille, on introduira les mesures, puis l'ordinateur du centre européen commencera les calculs sur la base de six équations, à savoir:

–la loi des gaz, reliant pression, densité et température;

–l'équation d'hydrostatique, exprimant le lien entre la variation de la pression avec l'altitude et la densité de l'air;

–l'équation de continuité, qui assume que la masse est conservée; elle permet donc de calculer la composante verticale de la vitesse et le taux de décroissance de la pression avec l'altitude;

–l'équation du mouvement, établissant qu'un changement de la vitesse du vent est lié à un gradient de pression et à la force de Coriolis; elle tient compte aussi des forces de frottement au voisinage de la surface terrestre;

–l'équation de la thermodynamique, qui couple la variation de la température d'une bulle d'air à un refroidissement ou à un réchauffement adiabatique lors d'un déplacement vertical, à la chaleur latente, au rayonnement solaire et à celui de la surface terrestre; elle relie également cette variation aux processus de turbulence et de frottement (diffusion);

–l'équation de l'humidité, qui suppose que l'hygrométrie d'une bulle d'air reste constante sauf en cas de de perte par condensation et précipitation, ou de gain par évaporation, à partir de nuages, des océans et des continents.

Le modèle européen tient compte aussi des ondes de gravité, résultant de l'interaction entre la surface de la Terre et l'atmosphère. L'orographie, à savoir les Alpes, les Pyrénées, les Apennins et le Massif Central (voir fig. 2), dont le rôle dans l'écoulement de l'air est important, est introduite dans l'ordinateur.

A noter que les deux premières des six équations données ci-dessus sont de nature «diagnostique», puisqu'elles expriment la relation statique entre divers paramètres, alors que les suivantes, dynamiques, son «pronostiques», car elles nous informent sur les mouvements et les variations, en fonction du temps, des vents horizontaux, de la température et de l'hygrométrie d'une bulle d'air (SÖDERMAN 1989).

Toutes les six heures (0 - 6 - 12 - 18 h GMT), les données issues des divers modes d'observation, transmises continuellement par un réseau de télécommunication planétaire, sont introduites dans l'ordinateur. Mais elles doivent passer un certain nombre de tests avant de pouvoir être utilisées.

Les critères de qualité vont d'abord éliminer les mesures ne respectant pas le code exigé, celles qui sont inconsistantes avec les autres mesures de la

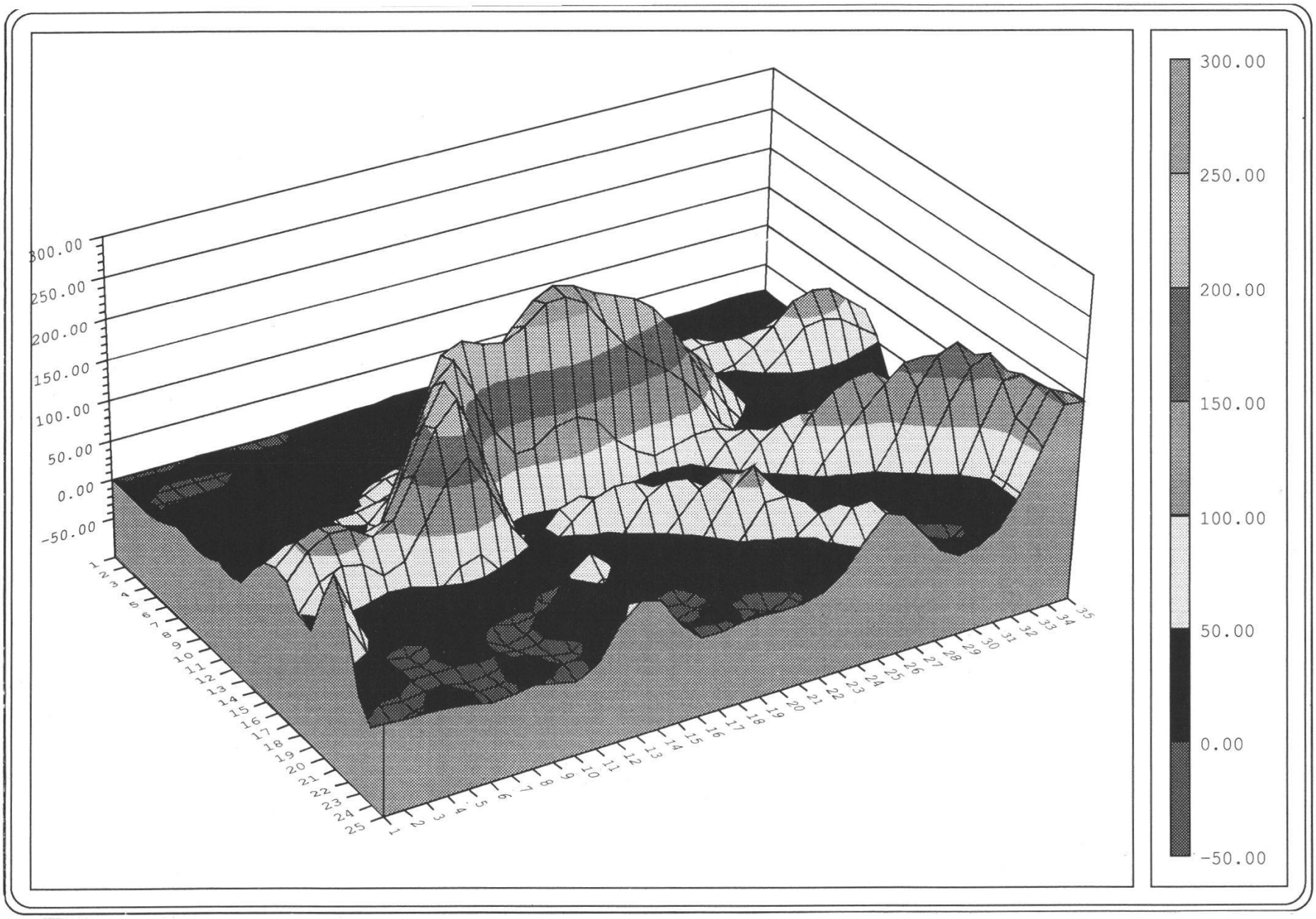

Figure 2.–L'orographie dont on tient compte dans le calcul de la prévision par ordinateur, au centre européen de Reading, près de Londres. Les Alpes dominent le tout; au sud, la péninsule italienne et, à droite, les Alpes dinariques; sur le devant, la petite pyramide blanche représente la Corse; tout à gauche, le Massif central et le début des Pyrénées. L'échelle verticale est donnée en décamètres.

même série, et celles qui ne sont pas en accord avec la climatologie locale (par exemple, une mesure indiquant 34 °C à 12 h locale au Groenland, en décembre). Toutes les erreurs grossières sont décelées à ce stade.

Il y a ensuite des tests plus fins: les données d'observation sont comparées avec une prévision préliminaire, basée sur des observations effectuées 6 heures auparavant. De plus, les observations sont groupées par paquets dans lesquels on doit avoir cohérence, et toutes les observations sont comparées avec celles faites dans le même secteur, ainsi qu'avec les résultats de la prévision.

Les stations transmettant des mesures un peu trop souvent suspectes, rejoignent une liste noire; leurs instruments devront être contrôlés (SÖDERMAN *loc. cit.*). Les erreurs systématiques peuvent résulter d'un blocage d'instrument, d'un mauvais calibrage, de la portée limitée de certaines informations, de la performance médiocre de certains satellites, etc.

Le modèle européen fournira une analyse globale aux temps synoptiques 0 - 6 - 12 - 18 h GMT, ainsi qu'une prévision à 10 jours à 12 h GMT. Comme condition initiale on aura toujours la situation qui prévalait 6 heures plus tôt, réactualisée constamment par le flot de données arrivant toutes les six heures. Un processus d'initialisation permet, selon la durée de la prévision, de supprimer certaines ondes dites de gravité (sinuosité du courant jet, ondes dues au relief, par exemple). Mais ce n'est pas nécessaire au-delà de trois jours, car elles s'amortissent dans le temps. L'ordinateur va alors simuler l'évolution des paramètres injectés, par pas de 15 minutes, et ceci pour plusieurs jours (une dizaine, mais on ne tient compte que des 7 premiers).

Les paramètres calculés et distribués aux états membres du Centre européen sont les suivants:

–à différents niveaux, la température, le vent, la vitesse verticale de l'air, l'humidité, ainsi que la pression au sol;

–des paramètres plus expérimentaux, comme la température à la surface et à 10 m du sol, la quantité totale de précipitations dans un laps de temps, le point de rosée à 2 m du sol, le vent à 10 m du sol, la hauteur de neige gisante et celle à attendre, les précipitations cumulées sur cinq jours et la couverture nuageuse;

–une analyse chaque six heures;

–une prévision chaque six heures, à 5 jours, et chaque 12 heures au-delà.

A noter que tous les paramètres calculés après le septième jour sont encore considérés comme expérimentaux.

L'échelle spatiale donnée par ce modèle numérique étant grande (maille grossière), plusieurs pays dont la France, l'Angleterre et le couple germano-suisse, s'appliquent à y intégrer un modèle numérique à fine maille (PHAM 1989, QUIBY *et al.* 1988, MAJEWSKI 1986). Le développement se fait dans la direction d'une grille à maille variable, par exemple grossière sur les Alpes, plus fine sur le Plateau, selon la demande (AMBÜHL *et al.*. 1992). On parle d'une maille de 15, voire 10 km (QUIBY *et al.*, *loc. cit.*)

La règle du jeu devient alors très simple: si l'on ne dispose pas d'un ordinateur assez puissant, c'est-à-dire assez rapide pour faire le calcul plus vite que l'évolution météorologique en temps réel, alors il vaut mieux se mettre au balcon et regarder le ciel. Si, au contraire, l'ordinateur peut effectuer en quelques heures ce que l'atmosphère mettra dix jours à faire, alors on commence à voir le bout du tunnel. Et pour effectuer cela, il faut disposer des

ordinateurs actuellement les plus performants. Pratiquement, ces «superinstruments» achèveront cette prévision en deux heures environ, en ayant effectué 2 milliards d'opérations. Il est clair que chaque jour, il faut réactualiser les mesures et recommencer les calculs. Cela permet aussi de tester les modèles en comparant l'évolution réelle avec ce que l'on avait prévu (AMBÜHL *et al.* 1992).

On se rend compte alors que la fiabilité des prévisions décroît rapidement avec le temps. Selon le filtrage effectué pour ne garder que les grandes structures atmosphériques, on atteint encore 70% des prévisions «bonnes» à cinq jours, mais cela chute à 50% à 6 jours et 7% à 8 jours (SÖDERMAN 1989).

En ce qui concerne notre pays, il y a alors un problème qui ne tarde pas à surgir, et il est de taille (c'est le cas de le dire): la maille du modèle est si grande (environ 100 km sur 100 km) que la Suisse est presque entièrement contenue dans un bloc ! Dans une zone sans relief, loin des côtes, cela n'aurait guère d'importance; mais avec la présence des Alpes et des modifications régionales du temps qu'elles apportent, cette maille est trop grande. Et si l'on voulait diminuer la taille des blocs de moitié et raccourcir le pas temporel, également de moitié, on se trouverait au-delà de la limite des ordinateurs actuels. La situation est donc présentement insoluble si l'on veut augmenter la précision de nos prévisions. Ce constat pour la Suisse peut paraître dramatique, mais il ne l'est pas foncièrement: avec un taux de réussite contrôlé de 85% pour les prévisions à deux jours et de 60% à six jours, cela représente déjà une jolie performance.

D'autre part, il ne faut pas se bercer d'illusions: la prévision à 100% est impossible. Pour l'atteindre, il faudrait faire une prévision, et donc des mesures, pour chaque m^2 de la surface terrestre, tant le développement d'une perturbation en un point peut affecter le temps à une très grande distance. N'a-t-on pas dit, d'une manière caricaturale, que le battement des ailes d'un papillon australien un peu nerveux pouvait engendrer un typhon au Bengla-Desh ou un ouragan aux Caraïbes ?

De toute façon, la prévision reçue de l'ordinateur est affinée par le prévisionniste local (Genève-Zurich-Locarno), et c'est à lui que revient le mérite de dessiner la carte diffusée dans notre pays, ainsi que le bulletin qui l'accompagne. Comme on le voit par cette ultime remarque, malgré les énormes progrès de la météorologie, à un siècle d'intervalle, le jugement de l'homme joue encore un rôle décisif que l'ordinateur n'est pas, pour le moment, prêt à assumer.

5. REMERCIEMENTS

Je remercie Jacques Ambühl et Lionel Fontannaz, météorologues à l'Aéroport de Genève-Cointrin, pour les renseignements qu'ils ont bien voulu me transmettre concernant le modèle européen, ainsi que Mme J. Berthoud, du Département de Minéralogie de l'Université de Genève, qui a dactylographié le manuscrit.

6. BIBLIOGRAPHIE

AMBÜHL J. et ECKERT P., 1992. DIAGNO II, prévision automatique des précipitations en Suisse. EPFL, Flash informatique n° 3.

BLANCHET R., 1843. Note sur l'orage qui a éclaté le 19 Juin dernier. *Bull. séances Soc. vaud. Sc. nat. 1.6*: 196-197.

DE LA HARPE J., 1845. Sur un arc-en-ciel blanc. *Bull. séances Soc. vaud. Sc. nat. 1.9*: 361.

GILLIÉRON J.-L., 1843a. Sur l'arc-en-ciel et les globules colorés. *Bull. séances Soc. vaud. Sc. nat. 1.5*: 138-143.

GILLIÉRON J.-L., 1843b. Sur les émanations atmosphériques qui affectent les organes des plantes et des animaux. *Bull. séances Soc. vaud. Sc. nat. 1.6*: 193-195.

HARDY R., WRIGHT P., GRIBBIN J. et KINGTON J., 1982. La météo, phénomènes, prévisions et climats. Fanal, Paris, 224 p.

MAJEWSKI D., 1986. Ergebnisse einer 5-Tage Vorhersage mit dem Europa-Modell. *DWD intern. Arbeiten der Forschungsabteilung Nr 6.*

PHAM H. L., 1989. Historique du modèle d'adaptation et de prévision locale: le modèle Péridot. Corr. au n° 28, *La Météorologie.*

QUIBY J., SCHUBIGER F. et BINDER P., 1988. Le programme MESOMOD de l'ISM (développement du modèle numérique de prévision à méso-échelle). Rapport de travail n° 150 de l'ISM, Zurich.

SÖDERMAN D., 1989. User Guide to ECMWF Products. Version 1.2, European Center for Medium-Range Weather Forecasts, 64 p.

VIAUT A, 1973. La météorologie. PUF, Paris, 127 p.

WARTMANN E., 1842a. Observations du solstice d'hiver 1841. *Bull. séances Soc. vaud. Sc. nat. 1.1*: 11-12.

WARTMANN E., 1842b. Observations météorologiques de l'équinoxe de printemps. *Bull. séances Soc. vaud. Sc. nat. 1.2*: 50-52.

WARTMANN E., 1842c. Observations du solstice d'été 1842. *Bull. séances Soc. vaud. Sc. nat. 1.4*: 92-93.

WARTMANN E., 1842d. Observations météorologiques de l'éclipse de soleil du 8 Juillet. *Bull. séances Soc. vaud. Sc. nat. 1.4*: 93-94.

Manuscrit reçu le 6 mai 1992