

Préface
Édouard Bard

Les savants des siècles derniers ne disposaient ni de techniques de mesures précises ni d'informations à grande échelle. Néanmoins, ces pionniers ont eu de nombreuses intuitions prophétiques et ont développé les principaux concepts fondamentaux que nous utilisons encore aujourd'hui.

La climatologie a été construite par des savants qui ont emprunté des voies très différentes, mais complémentaires. Certains ont passé leur vie à décrire de façon empirique les phénomènes naturels et à cartographier leurs observations à la surface du globe. D'autres se sont attachés à en comprendre les mécanismes élémentaires grâce aux progrès parallèles des sciences fondamentales comme les mathématiques, la physique, la chimie et la biologie. D'autres encore ont découvert que le climat de la Terre avait évolué à l'échelle des temps historiques et géologiques. Ces trois approches se sont fertilisées les unes les autres au fur et à mesure des progrès scientifiques. Certains pionniers se sont même intéressés à plusieurs de ces aspects, permettant des avancées majeures en climatologie.

Fin XVIII^e, début XIX^e siècle, le naturaliste allemand Alexander von Humboldt réalise de grands voyages de par le monde, tandis qu'au même moment la compréhension physique du climat fait un grand pas en avant avec les travaux de l'astronome anglais William Herschel. On lui doit la mise en évidence du rayonnement infrarouge et de son importance dans le transport de la chaleur.

Le genevois Horace-Bénédict de Saussure s'illustre par des recherches nombreuses et variées en climatologie. Ses inventions majeures sont l'«hygromètre à cheveu» et l'«héliothermomètre». Le but de ce véritable capteur solaire est l'étude du rayonnement solaire et de ses effets calorifiques à différentes altitudes. Son appareil est constitué d'une série de caisses emboîtées les unes dans les autres, et dont un côté est vitré. En 1824, Joseph Fourier s'intéresse à l'héliothermomètre et fait le parallèle avec le cas de la Terre. Il expose l'idée selon laquelle l'enveloppe atmosphérique du globe se comporterait comme le vitrage d'une serre.

Le physicien français Claude Pouillet effectue des recherches sur la propagation du rayonnement solaire. À l'aide d'un « pyréliomètre » de sa conception, il mesure de façon assez juste le flux de chaleur générée par les rayons du Soleil. Pouillet tente aussi de calculer numériquement l'influence, sur la température de l'atmosphère, de l'absorption du rayonnement solaire et de celui émis par la Terre. En faisant le bilan des transmissions de chaleur entre un globe placé dans une enceinte expérimentale, Pouillet démontre qu'il est possible de réchauffer le globe de plusieurs dizaines de degrés. La condition nécessaire est que l'enveloppe présente un effet de serre, c'est-à-dire qu'elle se caractérise par des coefficients d'absorption différents pour les flux venant respectivement du globe et de l'enceinte.

C'est en fait au chimiste et ingénieur irlandais, John Tyndall que l'on doit les premières données expérimentales sur l'absorption et l'émission des rayons infrarouges par les gaz. Ses analyses portent sur le pouvoir d'absorption de nombreux composés comme la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, diverses molécules organiques, des composés halogénés et enfin l'ozone. Tyndall mesure même les pouvoirs d'absorption des vapeurs de plusieurs parfums, comme l'essence de lavande et le patchouli ! S'intéressant également à l'environnement terrestre, Tyndall est convaincu de l'importance de l'effet de serre en climatologie.

La haute montagne est aussi un centre d'intérêt majeur pour Tyndall. Il visite chaque année les Alpes, et est même le premier à gravir le sommet suisse du Weisshorn. En collaboration avec Thomas H. Huxley, il publie, en outre, une étude scientifique sur la structure, le fonctionnement et les variations des glaciers. Grâce à des expériences réalisées avec de l'argile et de l'eau, ces auteurs tentent de montrer que le mouvement des glaciers ne se résume pas à l'écoulement d'un fluide visqueux, mais que la glace imite le comportement d'un fleuve *via* un processus de fracturation suivi d'un regel.

Même si sa contribution est souvent oubliée, Jacques Joseph Ebelmen, professeur à l'École des Mines de Paris et administrateur de la Manufacture royale des porcelaines de Sèvres, est le premier à suggérer que des changements du cycle du carbone ont pu faire varier dans le passé la teneur atmosphérique

en « acide carbonique » (CO_2) et, par voie de conséquence, le climat de la Terre. Quelques années plus tard, Tyndall reprend cette thèse pour expliquer les variations climatiques à long terme suggérées par les travaux des géologues.

Au XVIII^e et début du XIX^e siècle, de nombreux naturalistes, comme de Saussure, sont intrigués par la présence dans les larges vallées alpines de nombreux rochers de grande taille dénommés blocs erratiques, ainsi que de nombreuses buttes constituées de débris rocheux, appelées moraines. Ces objets se tiennent isolés au milieu des plaines et sont souvent de nature très différente des roches locales. Les naturalistes en concluent qu'ils ont été transportés sur des dizaines, voire des centaines de kilomètres. À l'époque, les théories au sujet de ce transport invoquent encore les effets du Déluge, soit directement par l'effet mécanique de l'eau, soit indirectement par le transport des blocs rocheux sur des « radeaux de glace ».

En se fondant sur l'observation des glaciers actuels, quelques montagnards et scientifiques suisses comprennent cependant qu'un transport par la glace pourrait expliquer ces énigmes de façon simple. En particulier, les moraines frontales poussées par les glaciers ont des équivalents moins élevés dans les vallées, ce qui suggère que l'extension des glaciers était autrefois plus importante. Des documents historiques viennent d'ailleurs corroborer ces études géologiques : certains cols, praticables au Moyen Âge, ne sont en effet plus accessibles en raison d'un englacement récent. Des constructions ont même été détruites par la progression de glaciers.

Quelques scientifiques voient dans ces fluctuations l'empreinte d'un véritable changement climatique. Ignace Venetz, ingénieur en chef du canton du Valais, signale des changements dans la distribution de certaines plantes, sauvages ou cultivées, qui suivent les variations des glaciers alpins. Jean de Charpentier, directeur des Mines du canton de Vaud et professeur honoraire de géologie à l'Académie de Lausanne, reprend à son compte les observations de Venetz, en les généralisant. La communauté scientifique est en fait majoritairement réticente à toutes ces nouvelles idées. Loin du terrain, les naturalistes des sociétés savantes restent persuadés que seule l'eau liquide a pu transporter les blocs erratiques sur de longues distances.

Néanmoins, la théorie du transport par les glaces prend corps grâce à quelques auteurs perspicaces et persévérants tels que Venetz, Charpentier et, plus tardivement, Louis Agassiz. Venetz imagine un glacier qui se serait jadis étendu des Alpes jusqu'au Jura, alors qu'Agassiz affirme que, pendant l'« âge glaciaire », une calotte gigantesque avait en partie recouvert l'hémisphère Nord jusqu'à des latitudes aussi basses que celles de la Méditerranée.

Parallèlement aux travaux réalisés en Europe, des géologues américains, en particulier Thomas C. Chamberlin, cartographient systématiquement les moraines des États-Unis. Peu de temps après, Chamberlin développe une classification des glaciations qui reste encore utilisée de nos jours. Des classifications similaires sont élaborées pour les régions européennes situées au sud de la mer Baltique et au nord des Alpes. En fait, la classification alpine, publiée en 1909 par les géographes allemands Albrecht Penck et Eduard Brückner, n'est pas fondée sur l'étude des moraines mais sur un autre type de preuve que sont les séries de terrasses alluviales observées aux abords des affluents du Danube.

S'intéressant aux calottes actuelles du Groenland et de l'Antarctique décrites par les explorateurs, le Français Joseph Adhémar a l'idée que l'hémisphère Sud est actuellement dans une période glaciaire. Il cherche à déterminer la cause de ce phénomène et de sa récurrence dans le temps. Bien qu'il ne dispose d'aucune donnée géochronologique pour dater les glaciations successives, Adhémar a cependant l'intuition géniale qu'elles doivent être périodiques, et donc pilotées par la mécanique céleste. Il tente de l'expliquer en invoquant les changements de durée des différentes saisons, variations qui sont liées au phénomène de la précession des équinoxes. En réalité, la différence saisonnière d'insolation des hémisphères est exactement compensée par le fait que la distance Terre-Soleil varie en fonction de la position de la Terre sur son orbite.

Quelques années plus tard, le géologue écossais James Croll reprend la théorie astronomique des glaciations en tenant compte des variations de la précession des équinoxes et de l'excentricité de l'orbite, terme dont la variation n'était pas connue par Adhémar. En se plongeant dans les travaux de

mécanique céleste, Croll comprend l'erreur d'Adhémar et élabore une théorie plus complexe, fondée sur l'effet du contraste saisonnier de l'insolation. Il faudra attendre un demi-siècle, avec les travaux du mathématicien serbe Milutin Milankovitch, pour une formulation complète de la théorie astronomique et les premiers calculs précis de l'insolation aux différentes latitudes. Délaissant la théorie astronomique pour expliquer les glaciations, certains auteurs comme Chamberlin et le chimiste suédois Svante Arrhenius se tournent vers une explication interne, liée à la Terre. En faisant intervenir les variations temporelles de l'effet de serre dû au gaz carbonique atmosphérique, ils reprennent les idées proposées par Tyndall quelques décennies plus tôt.

Arrhenius pense également que les périodes glaciaires ont été causées par des baisses de la teneur atmosphérique en gaz carbonique. Dans sa démonstration, publiée en 1896, il utilise les observations des géologues sur l'extension des dépôts glaciaires et en déduit que la température de cette époque a été de 4-5°C plus basse qu'à présent. Selon les calculs d'Arrhenius, ce refroidissement généralisé peut s'expliquer par une chute de l'ordre de 40% de la teneur en gaz carbonique. Il envisage aussi des effets amplificateurs du système climatique, liés notamment à l'augmentation de la couverture neigeuse et aux courants océaniques.

Pour Arrhenius, ces travaux sur l'effet de serre sont assez marginaux, mais ils s'inscrivent dans le cadre de la Société de Physique de Stockholm qui réunit régulièrement des scientifiques intéressés par les problèmes de géologie, de météorologie et d'astronomie. Faisant référence aux travaux d'un de ses collègues géologues, Arrhenius explique aussi que la complexité du cycle naturel du carbone permet tout à fait d'envisager que de petites variations des flux puissent se traduire par des changements importants de la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère, qui constitue le plus petit réservoir de ce cycle global. Arrhenius rappelle ainsi qu'à long terme, la teneur atmosphérique en CO₂ est essentiellement maintenue par un équilibre dynamique, donc potentiellement instable, entre les « exhalaisons » volcaniques et l'altération chimique des silicates qui constitue un puits majeur de gaz carbonique.

Dans le même temps, Chamberlin complète les notions sur le cycle du carbone utilisées par Arrhenius. Le géologue américain perçoit qu'il existe des effets rétroactifs qui contribuent à diminuer la teneur en gaz carbonique atmosphérique pendant les phases glaciaires. Il mentionne en particulier l'effet du refroidissement sur la solubilité du gaz. De plus, la mer expose à l'érosion chimique par l'acide carbonique, les roches qu'elle découvre en se retirant. Chamberlin décrit même l'effet de rétroaction du niveau marin sur le cycle du carbone. Pour lui, ces multiples effets moduleraient la teneur en gaz carbonique en se surimposant à long et court termes, et seraient donc à l'origine des oscillations glaciaires.

L'étude des glaciations est un exemple tout à fait typique de l'histoire du domaine de la climatologie. Ce phénomène complexe a été abordé, en parallèle, sous les trois angles mentionnés au début de cette préface : un point de vue purement descriptif sur les objets actuels, la compréhension des mécanismes physiques fondamentaux et enfin, la dimension temporelle de ces véritables révolutions du globe. Cette triple approche est à la base de l'étude moderne de nombreux autres événements climatiques.

Au XIX^e siècle, en pleine révolution industrielle fondée sur l'utilisation intensive du charbon, peu de scientifiques se soucient des conséquences des activités humaines sur le long terme et à l'échelle mondiale. Le fait même que le progrès technologique puisse générer un quelconque désagrément ne semble affecter ni la communauté technique ni le personnel politique de l'époque. Arrhenius, en revanche, est un peu plus préoccupé par l'impact des activités humaines. Il est le premier à prévoir une augmentation de la température moyenne de la Terre comme conséquence de l'utilisation industrielle des combustibles fossiles. Son article de 1896 traitant de l'influence du gaz carbonique sur la température est particulièrement prophétique.

Arrhenius calcule qu'un doublement de la teneur en gaz carbonique consécutif au développement industriel, se traduirait par un réchauffement mondial de la planète de l'ordre de 5 °C. Il est assez stupéfiant de constater que cette prévision plus que centenaire est encore compatible avec celles publiées en 2007 par les experts du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) ! En fait, Arrhenius a eu un peu de

chance, car les données de base sur l'effet de serre du CO₂ dont il disposait ainsi que son modèle d'atmosphère étaient encore rudimentaires. Les calculs d'Arrhenius montrent néanmoins que l'impact d'une augmentation de la teneur en gaz carbonique est amplifié aux latitudes les plus hautes. Il envisage aussi la rétroaction positive liée aux changements locaux de l'albédo dus à la régression de la couverture neigeuse. Arrhenius mentionne même une atténuation des cycles diurne et saisonnier, ainsi qu'une amplification du contraste de température entre océan et continent. Pourtant, le bouleversement climatique qu'il prédit ne l'inquiète pas réellement, il y voit même le moyen d'atténuer la rudesse du climat scandinave.

Les savants des siècles derniers ne disposaient ni de techniques de mesures précises ni d'informations à grande échelle. Néanmoins, ces pionniers ont eu de nombreuses intuitions prophétiques et ont développé les principaux concepts fondamentaux que nous utilisons encore aujourd'hui. Il faudra attendre la deuxième moitié du XX^e siècle pour assister à une véritable révolution des techniques d'investigation permettant l'exploration systématique de tous les compartiments du système climatique, en particulier la haute atmosphère, le fond des océans et l'intérieur des calottes de glace.

La prévision météorologique nécessite un suivi temporel des paramètres climatiques, ce qui a conduit à l'établissement d'un réseau mondial de stations de mesure. La plupart des postes d'observation relèvent la température de l'air, la nature et la hauteur des précipitations, la nébulosité, la force et la direction du vent, la pression atmosphérique, l'humidité de l'air et la chimie de l'air et des poussières.

Depuis les années 1960, des analyses réalisées par les capteurs embarqués sur les satellites sont venues compléter les données obtenues grâce aux stations fixes, aux ballons-sondes et aux bouées océanographiques. Ces nouvelles mesures concernent les nuages, les vents et les pluies, la présence de fumées et d'aérosols, la topographie des océans et des calottes de glace, la température des eaux marines de surface ainsi que leur teneur en chlorophylle. Cette liste n'est pas exhaustive, mais elle illustre déjà l'extrême diversité des paramètres mesurés de façon systématique par les satellites d'observation de la Terre.

De plus, toutes ces données climatiques sont aujourd'hui accessibles en temps réel grâce à la télétransmission et au stockage numérique des données. Les ordinateurs les plus puissants sont utilisés pour assimiler ces données et en étudier les tendances à toutes les échelles de temps. Collectivement, ces données servent aussi de contexte climatique aux modèles numériques fondés sur les lois physiques fondamentales qui permettent de prévoir le climat.

Ce qui a changé depuis l'époque des pionniers, c'est que les activités humaines ont clairement perturbé l'équilibre naturel qui prévalait encore au tout début de l'ère industrielle. L'augmentation des gaz à effet de serre est équivalente à environ 1 % du flux solaire, ce qui est tout à fait significatif. Pour l'essentiel, cette augmentation est liée à la combustion de carbones fossiles et à leur transformation en CO₂. L'amplitude, et surtout, la rapidité de l'augmentation des teneurs en gaz à effet de serre sont tout à fait inédites sur le plan géologique et de l'histoire de l'homme. Ceci a maintenant des conséquences sur le climat terrestre, ce qui place la climatologie et les scientifiques au cœur de vifs débats de société, touchant à notre mode de vie, à la politique, à l'économie et à la diplomatie à l'échelle mondiale. On ne peut qu'imaginer, et se prendre à rêver de ce que pourraient dire aujourd'hui nos héros du XIX^e siècle, notamment Joseph Fourier, Claude Pouillet, John Tyndall, James Croll, Thomas C. Chamberlin ou Svante Arrhenius.

Édouard Bard

Professeur au Collège de France

Titulaire de la chaire de l'évolution du climat et de l'océan

Directeur-Adjoint du Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement (CEREGE) d'Aix-en-Provence

Membre de l'Academia Europaea