

Introduction

Thierry PHULPIN

Météo-France, CNES, Toulouse, France

Le système Terre vu depuis l'espace

Les images satellitaires sont aujourd'hui d'un usage courant dans la présentation des bulletins météorologiques télévisés et elles sont maintenant également accessibles sur les smartphones. Tout le monde est désormais initié dès l'école à cette vision de la Terre depuis l'espace. Grâce aux satellites et à leurs imageurs, la planète Terre apparaît désormais à tous comme un milieu familier et est vue comme un système où tous les milieux sont interconnectés. Quand une tempête éclate, son intensité est marquée par la profondeur du gyre formé par la dépression et se traduit par des vents très puissants dont l'impact sur l'océan est très perceptible sur les données des satellites océanographiques. Une éruption volcanique, un séisme laissent des traces dans l'atmosphère (nuages de cendres, signaux ionosphériques, etc.) qui peuvent être observées et suivies, les fortes précipitations vues avec les instruments micro-ondes ou les sécheresses mesurées avec les sondeurs laissent des empreintes de surface détectées avec les satellites destinés à la surveillance des ressources continentales. Les relations entre la nature de la surface (océans, désert, sol nu, milieu urbain, cultures, forêts, etc.), son état à un instant donné (rugosité, état hydrique) et les conditions atmosphériques sont déterminants pour la météorologie, *via* les mécanismes d'émission thermique ou d'évaporation. Toutes ces relations peuvent être caractérisées, inférées ou mesurées par des satellites, certains destinés à l'océanographie, d'autres au suivi des surfaces terrestres ou enfin à la météorologie. Ces liens entre les divers compartiments du système terrestre ont commencé à être mis en évidence de façon nette dès que les populations humaines ou animales habitant la Terre ont commencé à échanger

Satellites pour les sciences de l'atmosphère 1,

coordonné par Thierry PHULPIN, Didier RENAUT, Hervé ROQUET et Claude CAMY-PEYRET.

© ISTE Editions 2025.

ou à être échangées entre les divers continents grâce aux découvertes des grands navigateurs. Ces découvertes, en permettant le développement d'une économie d'échanges commerciaux, ont conduit à la mise en place d'un système interdépendant et ont eu un impact majeur à l'échelle planétaire, notamment sur les divers écosystèmes. On pouvait donc déjà parler de système Terre dès le XVI^e siècle. Toutefois, ce sont les liens entre les phénomènes naturels observés qui ont permis de construire la notion de système climatique. De façon intuitive, on a perçu au cours des siècles que beaucoup de phénomènes, responsables de l'évolution de variables mesurables, étaient liés. On a pu établir des diagrammes comme celui de la figure 1. Mais on doit aux satellites d'avoir permis d'avancer dans la compréhension des processus (en complément des campagnes de terrain), d'avoir quantifié certains phénomènes à des échelles inaccessibles à des seules mesures depuis le sol, d'avoir pu établir des liens paramétriques entre certaines variables, et *in fine* permis d'améliorer la physique des modèles et de calibrer ou valider ces modèles.

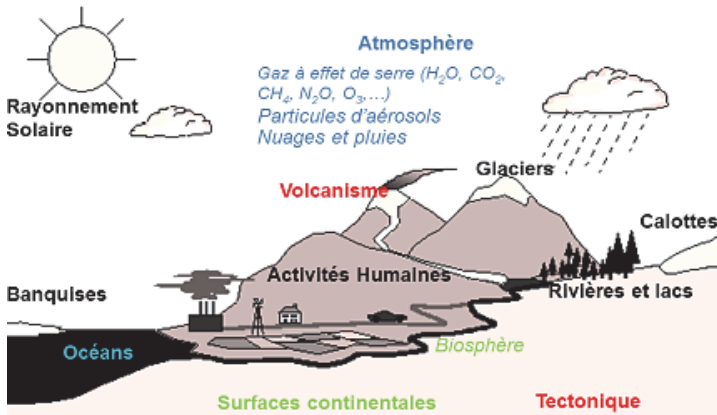


Figure 1. Les différents compartiments du système Terre pris en compte dans un modèle de climat

Il est donc logique d'aborder les divers sous-systèmes de la Terre dans un ouvrage consacré à la spatologie et de les considérer dans une approche cohérente.

L'atmosphère

Ce volume est consacré à l'observation par satellite de l'atmosphère et aux sciences qu'elle aura permis de développer : la météorologie, la composition atmosphérique ainsi que la connaissance du climat et de son évolution.

Selon Blum¹, c'est la maîtrise de la météorologie qui aurait permis aux alliés le débarquement, démontrant l'importance stratégique majeure à investir dans un réseau d'observation. Le transfert vers les États-Unis des ingénieurs allemands qui ont développé les V2 va permettre dès 1960 de disposer de photos de la Terre depuis l'espace, confirmant au passage la rotondité de notre planète et surtout pointant l'intérêt de ces observations pour une vision globale de la couverture nuageuse et de ses déplacements. Les États-Unis décident alors un programme de satellites météorologiques, précédant les Soviétiques puis l'Europe et le Japon. L'histoire de ces développements sera reprise dans le chapitre 1 du volume 1. Pour la météorologie, il est utile que les mesures satellitaires soient réalisées à la même heure solaire, pour mieux suivre l'évolution des paramètres thermodynamiques en les comparant aux relevés du jour précédent à la même heure, d'où l'utilisation d'orbites polaires héliosynchrones. D'un autre côté, la capacité de pouvoir observer la Terre de façon continue depuis l'orbite géostationnaire est aussi très séduisante pour déduire des mouvements apparents des nuages une information sur le vent et observer le développement des orages ou le déplacement des cyclones. Les orbites utilisées pour ces missions et leurs avantages seront décrits dans le chapitre 8 du volume 1. Il apparaît assez vite que la continuité à long terme et dans des conditions identiques des observations est nécessaire pour intégrer ces observations dans le réseau international des mesures météorologiques et pour en faciliter l'utilisation dans les modèles de prévision. On verra alors apparaître une dichotomie des missions : d'un côté des séries de satellites identiques dits opérationnels pour un programme s'étalant sur 20 ou 30 ans, et de l'autre des satellites équipés d'instruments innovants pour la recherche. Aux États-Unis, cette dichotomie est traduite par la séparation des responsabilités entre la NOAA et la NASA. Ces agences ont été pionnières pour la météorologie depuis l'espace. L'histoire de leurs programmes d'hier à aujourd'hui est présentée dans les premiers chapitres du livre intégrés à la partie 1 de l'ouvrage. Cette partie permet de montrer comment les programmes sont élaborés pour répondre aux besoins des utilisateurs, en utilisant les technologies les plus avancées dont les développements sont soutenus par les agences qui jouent le premier rôle dans ce domaine. Après les agences américaines, les chapitres 4 à 6 du volume 1 seront consacrés aux programmes européens de l'ESA, d'EUMETSAT et du CNES. On verra dans le chapitre 7 du volume 1 le rôle joué par l'Organisation météorologique mondiale pour coordonner les projets opérationnels émanant des États-Unis, de l'Europe ou de l'Asie. Il y sera aussi évoqué la problématique d'acquisition des données partout sur le globe pour une utilisation en temps réel.

La partie 2 de l'ouvrage est consacrée aux bases physiques des observations satellitaires pour les sciences atmosphériques. Le chapitre 8 du volume 1 exposera les principes d'orbitographie pour déterminer comment satisfaire le besoin d'observations

1. Blum, A. (2019). *The Weather machine. How we see in the Future*. The Bodley Head, Londres.

satisfaisant les besoins des météorologues ou des orbites plus adaptées à différentes problématiques comme le suivi des précipitations dans les zones intertropicales ou la qualité de l'air dans les régions les plus polluées. Les premiers satellites opérationnels ne proposaient qu'une observation dans un « canal » visible, identique à une photographie depuis le ciel, et une autre dans un canal infrarouge donnant une idée de la température des objets visés. Ces observations passives ont permis des avancées sur la cartographie des nuages et la température de la mer mais se sont montrées insuffisantes pour accéder à d'autres informations météorologiques. La palette des observations s'est vite enrichie d'observations dans de multiples autres canaux optiques et le domaine d'observation a été étendu au domaine micro-ondes, permettant, grâce à la numérisation des mesures, le passage à une utilisation quantitative des observations. La physique de la mesure développée pour proposer des techniques de mesure passive ou active et mieux utiliser les données qui en résultent est présentée dans le chapitre 9 du volume 1. Dans le chapitre suivant, on expose le problème qui consiste à retrouver les variables atmosphériques intéressantes à partir des observations et les principales méthodes mises en œuvre à cette fin.

La partie 3 de l'ouvrage est plus spécifiquement consacrée à la météorologie. En ce qui concerne la distribution tridimensionnelle de la température, de l'humidité et du vent, la principale donnée utile pour la météorologie a longtemps été fournie par des radiosondages. Mais ces observations sont rares au-dessus des océans, aussi a-t-on imaginé de les compléter par des mesures satellitaires des répartitions verticales de la température et de l'humidité. La technique utilisée repose sur l'absorption sélective du dioxyde de carbone ou de l'oxygène peu abondant mais répartis uniformément dans l'atmosphère (en tout cas au premier ordre), et de la vapeur d'eau ainsi que d'autres gaz à effet de serre absorbant fortement le rayonnement dans l'infrarouge ou les micro-ondes. Cette méthode, d'abord expérimentée par les Américains avec IRIS* sur Nimbus IV a ensuite donné lieu aux sondeurs radiométriques TOVS*, avant d'évoluer grâce aux progrès techniques vers des mesures spectrométriques beaucoup plus fines et précises avec AIRS* et IASI*.

Après les chapitres 1 à 2 du volume 2 exposant la restitution des principales variables caractérisant l'état de l'atmosphère ou celle des variables de surface utiles de façon directe ou nécessaires à l'inversion des caractéristiques atmosphériques, les chapitres 4 à 6 du volume 2 seront centrés sur les applications majeures de ces observations : la prévision du numérique du temps, la prévision à court terme et le suivi des cyclones.

* Les termes notés d'un astérisque invitent le lecteur à se reporter à l'annexe 3 dans laquelle lesdits termes sont définis.

Le succès des missions de sondage atmosphérique par spectrométrie repose aussi sur leur capacité à restituer des composants atmosphériques minoritaires importants pour la planète ou pour la santé humaine tels que l’ozone stratosphérique, les gaz et particules qui interviennent dans la qualité de l’air ou les gaz à effet de serre.

L’utilisation des observations spatiales et les bénéfices qui en sont tirés seront présentés dans la partie 4 : détection des espèces polluantes dangereuses pour la santé (chapitres 7 et 8 du volume 2), observation des nuages de poussières désertiques et des éléments émis par les feux de brousse ou de forêts. Le chapitre 11 du volume 2 sera consacré à la chimie stratosphérique mieux connue et comprise grâce aux nombreuses observations satellitaires consacrées au suivi du trou d’ozone.

Parce qu’ils offrent des observations précises et bien ciblées avec une couverture spatiale globale, les satellites ont largement contribué à mieux comprendre les processus en jeu dans le climat de la Terre. De plus, la continuité des observations sur le long terme (plus de 30 ans de données !) permet de suivre l’évolution du climat et d’attribuer certains phénomènes à cette évolution. La partie 5 de l’ouvrage concerne l’utilisation des observations satellitaires pour l’analyse des processus climatiques et le suivi de variables climatiques. En introduction, le chapitre 12 du volume 2 rappelle l’importance de données bien étalonnées, la nécessité de retraiter de façon homogène les données acquises au cours du temps et de répéter le retraitement des produits au fur et à mesure de la disponibilité d’algorithmes plus performants et de la disponibilité de nouvelles mesures. Le chapitre 13 du volume 2 est consacré à la restitution des gaz à effet de serre CO_2 et CH_4 et à la localisation des puits et sources de ces gaz, qui jouent un rôle majeur dans le réchauffement de l’atmosphère. Les nuages et la vapeur d’eau ont également un rôle primordial. Or ces variables sont suivies depuis les tout premiers satellites. Les techniques d’analyse se sont affinées et de nouvelles données produites avec des instruments plus précis sont arrivées, permettant d’estimer plus précisément la distribution spatiotemporelle de l’eau atmosphérique (chapitre 14 du volume 2). Celle-ci intervient également dans les précipitations dont la répartition et l’intensité sont suivies avec régularité (chapitre 15 du volume 2).

On trouvera en fin d’ouvrage, outre un index, un glossaire pour préciser la définition de certaines notions, des annexes dont une rassemblant les noms d’instruments et de satellites dont il est question (à actualiser au fur et à mesure de l’arrivée de nouvelles missions), ainsi qu’une liste des acronymes.