

## LA SURVEILLANCE DU CLIMAT PLANÉTAIRE AVEC LE SMOC

**Régis JUVANON DU VACHAT**

*Météo et Climat, 73, Avenue de Paris, 94165 St Mandé Cedex, RJduVachat@gmail.com*

**Résumé :** Le Système Mondial d'Observation du Climat (SMOC) a été créé en 1992 sous l'égide de l'OMM, de la COI, du PNUÉ et du CIS, pour garantir la surveillance du climat planétaire pour la Convention climat (UNFCCC) et le GIEC. Ce système comprend l'observation de l'atmosphère (et sa composition), de l'océan, et de la couverture terrestre (glaciers), avec des observations *in situ* ou par satellite. Pour obtenir une observation de qualité, les concepts de variable climatique essentielle et de réseau atmosphérique de référence sont développés. L'initiative « Changement climatique » de l'Agence Spatiale européenne répond aussi aux critères du SMOC, avec des enregistrements climatiques de qualité. La conclusion résume le récent rapport d'évaluation du SMOC.

**Mots-clefs :** Climat global, Observation, Réseau de référence, Atmosphère

**Abstract :** The Global Climate Observation System (GCOS) has been created in 1992 under the auspices of WMO, IOC, UNEP and SIC, to monitor the global climate for the UNFCCC and IPCC. That system includes the observation of the atmosphere (including its composition), of the oceans and of the terrestrial surface (glaciers and land cover), by using conventional or satellite measurements. Two concepts have been developed in order to obtain high quality observations for climate : essential climate variables and reference atmospheric network. Concerning satellite measurement the Climate Change Initiative has been proposed by European Space Agency to comply with GCOS principles. The conclusion presents the results of the last GCOS Implementation Plan.

**Key-Words :** Global climate, Observation, Reference network, Atmosphere

### Introduction

Le Système Mondial d'Observation du Climat (SMOC, GCOS en anglais) a été créé en 1992 sous l'égide de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM), de la Commission Océanographique Internationale (COI), du Programme des Nations Unies sur l'Environnement (PNUÉ) et du Conseil International de la Science (CIS). Sa création en 1992 correspond à la signature de la Convention Climat à Rio, pour garantir la permanence de l'observation du climat pour le compte de la Convention climat (UNFCCC), du GIEC et du Programme Mondial de Recherche sur le Climat. Ce système intègre les systèmes d'observation de l'atmosphère, incluant sa composition, notamment les gaz à effet de serre (GES), de l'océan, et de la couverture terrestre (fleuves, glaciers). Il s'agit d'observations effectuées sur site (*in situ*) ou par satellite. Au-delà des principes élémentaires de « bonne pratique » du genre « assurance qualité », qui porte sur la mesure des paramètres, des principes d'adéquation aux besoins pour la connaissance du climat global ont été définis. Ce sont les notions de variables climatiques essentielles (devenues de plus en plus nombreuses au cours du temps) et la notion de réseau d'altitude de référence (GRUAN) qui sont développées dans la présentation générale du SMOC (§ 1). Sur le plan satellitaire, l'initiative « Changement climatique » de l'Agence Spatiale Européenne a démontré la capacité de la mesure satellitaire à satisfaire les exigences du SMOC (globalité, permanence de la mesure) pour produire des enregistrements climatiques de qualité (§ 2). L'évaluation du SMOC et sa mise en œuvre sont abordées au § 3,

avec le dernier rapport d'évaluation présenté à la COP26 de Glasgow (2021). La conclusion présente la vision actuelle et future du SMOC.

## **1. Présentation générale du SMOC**

### **1.1 Variables climatiques essentielles**

En 2022, le SMOC comprend 54 variables climatiques essentielles qui couvrent les trois domaines : l'atmosphère, la surface terrestre et l'océan. Ces variables climatiques essentielles sont définies sur la base des trois critères suivants (Bojinski et al., 2014) :

- Pertinence : la variable est essentielle pour caractériser le système climatique et ses changements.
- Faisabilité : l'observation ou la dérivation de la variable à l'échelle mondiale est techniquement possible en utilisant des méthodes éprouvées et scientifiques.
- Rentabilité : la production et l'archivage de données sur la variable sont abordables, et reposent sur des systèmes d'observation déjà existants.

Paul Mason, qui a présidé le comité stratégique du SMOC a poussé à développer ce concept. Pour l'atmosphère, 16 variables (en surface et en altitude) incluent : température de surface et d'altitude, précipitation, bilan de rayonnement, éclairs et foudre, vent (force et direction), vapeur d'eau, gaz à effet de serre, nuage, aérosols et ozone. La surface terrestre (19 variables) comprend l'hydrosphère (lacs, rivière, eau du sol), la cryosphère (glaciers, calottes glaciaires, permafrost et neige), la biosphère (biomasse, albedo, couverture de la surface, feux, carbone et humidité du sol, ...) mais aussi l'anthroposphère avec les flux de GES et l'utilisation de l'eau. L'océan comprend 19 variables physiques : température, salinité, courants marins, niveau de la mer, flux de chaleur en surface, mais aussi des variables chimiques (carbone, couleur, oxygène, ...) et biologiques (habitats marins, plancton).

Depuis le rapport d'évaluation de 2015, la stratégie du SMOC a évolué et ne se focalise plus sur les variables individuelles, mais étudie aussi leurs interactions mutuelles, à travers les cycles de l'énergie, de l'eau et du carbone. On peut ainsi calculer les composantes de ces cycles à une échelle globale ou continentale et étudier leur évolution. Mieux comprendre leur fonctionnement et leur évolution est essentiel pour développer l'adaptation et l'atténuation du changement climatique. Par exemple des changements dans la disponibilité de l'eau sous toutes ses formes affectent la qualité de l'eau, qui est un bien humain essentiel. L'évolution du cycle de l'énergie pourra engendrer des extrêmes de chaleur, de précipitation, de sécheresse, alors que le cycle du carbone influera sur le cycle de l'énergie, mais aidera aussi à mieux définir des cibles limites d'émission de GES. Cette notion de cycles sera illustrée avec le dernier rapport d'évaluation du SMOC (2021) au § 3.

### **1.2 Réseau atmosphérique d'altitude de référence (GRUAN)**

Le réseau d'observation atmosphérique comprend des observations de surface (GSN) avec 1023 stations et un réseau d'altitude (radiosondages, GUAN) avec 177 stations en 2020. Un sous-ensemble de ce dernier réseau est le GRUAN (R pour Reference) disposé irrégulièrement mais avec des radiosondages de haute qualité et de référence, permettant un calcul de longues séries et le calage des mesures satellitaires (Bodeker et al., 2016). Il s'agit d'observations de l'atmosphère depuis la troposphère jusqu'à la stratosphère, avec les mesures des variables climatiques essentielles : température, force et direction du vent,

vapeur d'eau, couverture nuageuse, et le bilan du rayonnement terrestre (incluant l'irradiation solaire). Fin 2021 ce réseau comportait 30 sites GRUAN, dont la moitié est certifiée suivant un protocole précis. La gestion opérationnelle de ce réseau a été confiée en 2008 à l'Observatoire météorologique de Lindenberg en Allemagne. En 2020 deux stations GRUAN ont vu le jour en Antarctique : Neumayer avec l'Alfred Wegener Institute et l'île de Ross avec le Radiosondage de Mac Murdo (États-Unis) certifiée en 2021. Elles sont gérées opérationnellement par la Nouvelle-Zélande. Les sites GRUAN, incluent les observatoires bien connus de Boulder (États-Unis), Darwin (Australie), Cabauw (Pays-Bas). Pour la France : La Réunion (Dufлот et al., 2018) et Trappes-Palaiseau (Météo-France et SIRTA) sont deux sites en cours de certification. En effet le SIRTA au sein du Laboratoire de Météorologie Dynamique à Palaiseau dispose de moyens d'instrumentation importants (Lidar, ...) et travaille avec la station de Radiosondage de Trappes (Météo-France).

Voici des illustrations des activités menées dans les sites de Cabauw (Pays-Bas) et de La Réunion. Le site de Cabauw, proche du site canonique du radiosondage du Service Météorologique hollandais (KNMI) à de Bilt, est doté depuis les années 1970 d'une tour de 200 m, pour l'étude des transferts dans la couche limite. Ceci a fait l'objet d'une publication récente sur les 50 ans de mesure (Bosvel et al., 2020). On y découvre la présence de réseaux d'observation variés (BSRN, GAW, ICOS) mais aussi vingt-cinq campagnes de recherche de 1995 à 2019, concernant les nuages, les aérosols, les GES et des campagnes de validation instrumentale du rayonnement et des mesures satellitaires.

L'Observatoire de Physique de l'Atmosphère de La Réunion est un site d'observation unique par la qualité de ses infrastructures et de ses instruments, comme par sa localisation dans une zone relativement déserte en observations. On y étudie les processus physico-chimiques essentiels pour le climat : dynamique de l'atmosphère (intrusions stratosphériques), vapeur d'eau, ozone, aérosols, GES. L'observatoire du Maïdo inauguré fin 2012, participe aux réseaux d'observation internationaux : NDACC (composition de l'atmosphère), AERONET (aérosols), ICOS (carbone) et ambitionne d'être labellisé station globale du GAW. Il participe au réseau GRUAN depuis 2008. L'actualité récente illustre son expertise : le nuage de l'éruption volcanique des îles Tonga est arrivé le 22 janvier 2022 à La Réunion et y a fait l'objet d'une étude par une équipe internationale.

## **2. L'initiative changement climatique de l'Agence Spatiale Européenne**

L'Agence Spatiale Européenne a développé l'initiative « Changement climatique » pour produire des variables climatiques essentielles et leurs enregistrements climatiques avec ses programmes d'observation de la terre, répondant ainsi aux exigences du rapport de mise en œuvre du SMOC (GCOS Implémentation Plan 2010). Voici les raisons invoquées : Capacité d'observation de zones étendues à partir de satellites polaires ou géostationnaires ; Observations non intrusives dans les États ; Uniformité (même capteur dans des lieux différents) ; Capacité d'observation rapide et accès à des zones inhospitalières (déforestation, glaciers, ...); Continuité de l'observation (capteurs fournissant de longues séries chronologiques de données pour des études climatiques).

Cette initiative a porté sur 13 variables climatiques essentielles pour les trois domaines : atmosphère, couverture terrestre, océan, qui ont été étudiées dans des projets lancés en 2010 et 2012 (Hollmann et al., 2013). Pour l'atmosphère, ces projets concernent l'ozone, les nuages, les aérosols et deux GES (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>). Bojinski et Fellous (2013) détaillent les résultats obtenus

pour ces cinq variables. Popp et al. (2020) définissent les enregistrements climatiques faits à partir de mesures satellitaires, utiles pour la surveillance du climat, et obtenus, entre autres, avec cette initiative.

Pour l'Agence Spatiale Européenne ces productions sont utiles pour les chercheurs en modélisation, pour le changement climatique (détection, attribution) et les réanalyses. Un groupe d'interaction a d'ailleurs été créé avec les chercheurs modélisateurs. Les résultats obtenus pour 21 variables climatiques essentielles concernées par cette initiative changement climatique ont été rendus opérationnels dans le cadre du programme européen Copernicus (le service du changement climatique C3S). On note ainsi la part grandissante de l'observation satellitaire dans le SMOC, à tel point que les 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> plans de mise en œuvre du SMOC (2004, 2010) possèdent une Annexe spécifique sur l'observation satellitaire.

### **3. Évaluation de l'adéquation au climat et cycles (énergie, eau, carbone)**

Environ tous les 5 ans une évaluation du SMOC est réalisée, qui donne lieu à un diagnostic de l'état du SMOC, puis à un plan de mise en œuvre. Voici quel en est l'historique. En 1998 et 2003, des rapports d'adéquation du SMOC ont été publiés pour le compte de la Convention Climat (UNFCCC) qui en est le commanditaire. Par la suite trois rapports de mise en œuvre ont vu le jour en 2004, 2010 et 2015 (état du SMOC), avec un supplément satellitaire pour les deux premiers, comme cela vient d'être indiqué. Le rapport sur l'état du SMOC en 2015 a été présenté lors de la conférence de Paris. Depuis, cinq ans se sont écoulés et un nouveau rapport est paru en 2021 qui analyse l'état du SMOC et prépare pour 2022 un plan de mise en œuvre. A noter qu'en octobre 2021, une conférence sur l'observation du climat devait avoir lieu, mais a été reportée à cause de la pandémie Covid-19 en octobre 2022 à Darmstadt (siège d'Eumetsat), qui pourra donner de la visibilité à ce programme du SMOC. Cependant dans ces arènes internationales, se font jour des critiques sur ces gros rapports d'évaluation (autour de 300 pages) qui contiennent des demandes générales plutôt que des actions précises, et qui sont difficiles à opérationnaliser ! Un rapport plus concis devrait paraître en 2022 ciblé sur les systèmes d'observation et ceux qui les mettent en œuvre plutôt que sur les variables climatiques essentielles !

L'étude du climat de la planète concerne l'énergie provenant du soleil, la circulation atmosphérique et océanique, ou encore d'autres variables climatiques ou même des zones particulières (étendue de glace). Mais on peut aussi considérer les cycles de l'énergie, de l'eau et du carbone qui ont un sens physique global pour la planète, les deux derniers étant très importants pour l'homme : l'eau pour sa subsistance et le carbone pour les émissions de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>) qui doivent être maîtrisées. Ces trois cycles sont interdépendants comme l'indique la figure représentant le système climatique (cf. Figure 2, Simmons et al., 2016). Cette représentation du système climatique à l'aide de cycles s'est imposée à partir de la notion de science du climat planétaire (Earth System Science) et constitue le socle de l'analyse du dernier rapport du SMOC (2021).

### **Conclusion**

Pour conclure alors que le programme SMOC fêtera ses 30 ans en juin prochain, voici quelques points qui émergent de cette présentation du SMOC. Tout d'abord rappelons que l'observation du climat joue un rôle essentiel, au moins de lanceur d'alerte, comme on le voit avec une diapositive sur le rétrécissement de la banquise d'été en Arctique lors d'un exposé

d'un membre du GIEC. Il en est de même pour les gaz à effet de serre dont il faut maîtriser les émissions. Pour autant il est difficile de relier l'observation du climat à des actions précises d'atténuation ou d'adaptation. Pour ce dernier objectif, il s'agit plutôt d'observer et de suivre des indicateurs, plutôt que d'observer des paramètres bruts.

Un point important à souligner est la faiblesse des réseaux d'observation dans les pays en développement, notamment en Afrique et en Amérique Latine. A sa création, le programme du SMOC était très conscient de ces lacunes et a imaginé une série de dix ateliers régionaux pour remédier à ces déficiences (cf. le site Internet du GCOS/WMO). Il est clair que la campagne AMMA a probablement mieux réussi dans ce domaine, même si la pérennisation des observations réalisées dans le cadre de la campagne reste à assurer.

Pour finir quelle vision donner à ce programme du SMOC : la part satellitaire y joue un rôle important, mais la part conventionnelle reste essentielle à la fois pour la surveillance du climat et la validation de la mesure satellitaire. Soulignons enfin que la coordination internationale joue un rôle majeur pour éviter lacunes et redondances de ce système d'observation (Simmons et al., 2016).

### Sigles

AERONET : Aerosol Robotic Network

AMMA : Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine

BSRN : Baseline Surface Radiation Network

C3S : Copernicus Climate Change Service

CIS : Commission Internationale pour la Science (SIC en anglais)

COI : Commission Océanographique Internationale (IOC en anglais)

GAW : Global Atmosphere Watch (Veille de l'Atmosphère Globale)

GCOS : Global Climate Observing System (SMOC en français)

GIEC : Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat (IPCC en anglais)

GSN : GCOS Surface Network

GRUAN : GCOS Reference Upper-Air Network

GUAN : GCOS Upper-Air Network

ICOS : Integrated Carbon Observation System

IPCC : Intergovernmental Panel for Climate Change

NDACC : Network for the Detection of Atmospheric Composition Change

OMM : Organisation Météorologique Mondiale (WMO en anglais)

PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement (UNEP en anglais)

SIRTA : Site Instrumental de Recherche en Télédétection Atmosphérique

SMOC : Système Mondial d'Observation du Climat (GCOS en anglais)

UNFCCC : United Nations Framework Convention for Climate Change

### Bibliographie

Bodeker G. E., S. Bojinski, S. Cimini, R. J. Dirksen, M. Haeffelin, F. Madonna, P. Thorne and J. Wang, 2016 : Reference upper air observations for climate. From concept to reality. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **97**, 123-135.

Bojinski S. et J.-L. Fellous, 2013: Response by ESA to GCOS. The Climate Change Initiative. ESA Document

Bojinski S., M. Verstraete, T. Peterson, C. Richter, A. Simmons, M. Zemp, 2014 : The concept of essential climate variables in support of climate research, applications and policy. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95**, 1431-1443.

Bosveld F., P. Baas, A. Beljaars, A. Holstlag, and B. van de Wiel, 2020 : Fifty years of atmospheric boundary-layer research at Cabauw serving weather, air quality and climate. *Bound.-Layer Meteorology*, **177**, 583-612.

Duflot V., P. Tulet et J.-P. Cammas, 2018 : L'Observatoire de physique de l'atmosphère de La Réunion : sentinelle climatique de l'hémisphère Sud. *La Météorologie*, **103**, 38-49.

Hollmann R., C. Merchant, R. Saunders, C. Downy, A. Cazenave and W. Wagner, 2013 : The ESA Climate Change Initiative : Satellite data records for essential climate variables. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, 1541-1552.

Popp T., R. Hollmann, F. Arduin, J. Boutin, P. Ciais, R. Jones, M. Schröder, and W. Ulrika, 2020 : Consistency of satellite climate data records for earth system monitoring. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **101**, E1948-E1971.

Simmons A., J.-L. Fellous, K. Trenberth, G. Asrar, P. Ciais, P. Friedlingstein, E. Guyliardi, and T. Sheperd , 2016 : Observation and Earth-system science : A roadmap for 2016-2025. *Adv. Sci. Res.*, **10**, 2037-2103.