



LES DOSSIERS

- De l'espace pour le climat
- *Space for the climate*



DE L'ESPACE POUR LE CLIMAT

© **AAE – 2020**

Tous droits réservés

Crédits photo couverture de haut en bas

Sentinel-2 © ESA - MetOp-B © ESA - Earth from Apollo 17 © NASA

JASON-3 © CNES David-Ducros

AAE

Ancien observatoire de Jolimont

1 avenue Camille Flammarion

31500 Toulouse - France

Tel : +33 (0)5 34 25 03 80

contact@academie-air-espace.com

www.academieairespace.com

ISBN 978-2-913331-83-9

ISSN 1147-3657

Dépôt légal : juin 2020

Dossiers récents

- n°46 De Concorde aux nouveaux projets d'avions supersoniques, 2020
- n°45 Cybermenaces visant le transport aérien, 2019
- n°44 Le transport de passagers par appareils à voilure tournante à l'horizon 2050, 2018
- n°43 L'Espace au service de la sécurité et de la défense ;
pour une nouvelle approche européenne, 2018
- n°42 Aviation plus automatique, interconnectée, à l'horizon 2050, 2018
- n°41 Les disparitions d'avions : une question pour les transports aériens, 2017
- n°40 Présent et futur des drones civils, 2015
- n°39 Matériaux aéronautiques d'aujourd'hui et de demain, 2014
- n°38 Comment volerons-nous en 2050 ?, 2013
- n°37 Le Traitement des situations imprévues en vol, 2013
- n°36 Quel avenir pour l'industrie aéronautique et spatiale européenne ?, 2013
- n°35 Trafic aérien et météorologie, 2011
- n°34 Une stratégie à long terme pour les lanceurs spatiaux européens, 2010
- n°33 Les Aéroports face à leurs défis, 2010
- n°32 Prise de risque : conclusions et recommandations, 2009
- n°31 Pour une approche européenne à la sécurité dans l'espace, 2008
- n°30 Le Rôle de l'Europe dans l'exploration spatiale, 2008
- n°29 Le Transport aérien face au défi énergétique, 2007
- n°28 La Sécurité des compagnies aériennes, 2007
- n°27 L'Europe de l'Espace ; enjeux et perspectives, 2006
- n°26 Compagnies de transport aérien à bas prix, 2006
- n°25 La Révolution des drones, 2005
- n°24 L'Impact du trafic aérien sur l'environnement, 2004
- n°23 La Menace balistique : quelle politique pour la France et l'Europe ?, 2004
- n°22 L'Europe et les débris spatiaux, 2003
- n°21 Retour d'expérience dans l'aviation civile, 2003

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|----|
| AVANT-PROPOS | 6 |
| 1- INTRODUCTION | 8 |
| 2- CONTEXTE | 11 |
| Les modèles de climat | 11 |
| Le système Terre..... | 11 |
| Sa modélisation..... | 13 |
| 3- LES PRINCIPAUX GAZ À EFFET DE SERRE | 16 |
| Le dioxyde de carbone | 17 |
| Caractéristiques, sources et puits..... | 17 |
| Le satellite, un outil nécessaire mais pas suffisant..... | 20 |
| La difficile mesure des émissions anthropiques..... | 20 |
| Des impératifs politiques..... | 22 |
| Le méthane | 23 |
| Caractéristiques..... | 23 |
| Les bilans du méthane..... | 23 |
| Observations d'autres variables atmosphériques | 25 |
| Vapeur d'eau, nuages..... | 25 |
| Aérosols..... | 27 |
| Vent..... | 28 |
| Le rôle du spatial | 30 |
| 4- PROGRAMMATION DES MISSIONS SPATIALES POUR LE CLIMAT | 33 |
| Des limites techniques et financières | 33 |
| Des programmes ambitieux | 34 |
| L'Agence spatiale européenne..... | 34 |
| CNES..... | 38 |
| EUMETSAT..... | 40 |
| NASA/NOAA..... | 41 |
| JAXA..... | 42 |
| Programmes d'observation de la Terre de la Chine..... | 42 |
| 5- CONSTAT ET RECOMMANDATIONS | 44 |
| Annexes : | |
| Glossaire..... | 47 |
| Participation..... | 48 |
| Programme du colloque..... | 49 |

TABLE DES FIGURES

| | | |
|-------------|--|----|
| Figure 1 : | Les grands risques économiques mondiaux | 9 |
| Figure 2 : | Évolution des émissions globales de gaz à effet de serre. | 10 |
| Figure 3 : | Conception des simulations CMIP6..... | 12 |
| Figure 4 : | Projections du 5 ^e rapport du GIEC d'élévation de température..... | 13 |
| Figure 5 : | Transport d'énergie et de matière par les vents de surfaces et en altitude | 14 |
| Figure 6 : | Les 54 variables climatiques essentielles | 15 |
| Figure 7 : | Évolution du niveau de la mer mesurée par les altimètres spatiaux..... | 15 |
| Figure 8 : | Corrélation entre l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et l'activité humaine | 16 |
| Figure 9 : | Schéma de transfert entre les sources et les puits sur douze ans | 17 |
| Figure 10 : | Variations annuelles du bilan de CO ₂ | 18 |
| Figure 11 : | Interactions entre les vents et la circulation océanique..... | 19 |
| Figure 12 : | Améliorer l'inventaire des émissions | 19 |
| Figure 13 : | Spécifications requises pour un système satellitaire permettant le contrôle des émissions anthropiques de CO ₂ | 21 |
| Figure 14 : | Les programmes spatiaux passés, présents et futurs pour la mesure de CO ₂ | 21 |
| Figure 15 : | Actions menées dans le cadre du programme Copernicus pour le contrôle des émissions de CO ₂ | 22 |
| Figure 16 : | Le méthane, autre gaz à effet de serre | 23 |
| Figure 17 : | Global carbon project : mise à jour du bilan global du méthane..... | 24 |
| Figure 18 : | Émissions de méthane anthropique et naturel dans l'Arctique. | 25 |
| Figure 19 : | Forçage radiatif sur la période 1980-2011 dû aux activités humaines..... | 27 |
| Figure 20 : | Aeolus : premiers résultats encourageants | 29 |
| Figure 21 : | Différents types d'instruments spatiaux. | 30 |
| Figure 22 : | Mesure de CO ₂ depuis l'espace | 31 |
| Figure 23 : | Le sondeur IASI : une percée majeure pour les prévisions météorologiques et climatiques..... | 32 |
| Figure 24 : | Programmation de l'Agence spatiale européenne. | 35 |
| Figure 25 : | La famille des satellites Sentinel. | 36 |
| Figure 26 : | Programmes CNES en exploitation..... | 38 |
| Figure 27 : | Programmes CNES en préparation..... | 39 |
| Figure 28 : | Planification des programmes d'EUMETSAT. | 40 |
| Figure 29 : | Constellation de satellites GPM..... | 42 |

AVANT-PROPOS

L'Académie de l'air et de l'espace a souhaité prendre part au débat actuel sur l'impact des activités humaines sur le climat en organisant un colloque international en octobre 2017 pour mieux examiner l'apport du spatial dans la surveillance des variables climatiques, en particulier les gaz à effet de serre. L'objectif de ce colloque était, d'une part, de faire comprendre aux participants les enjeux des observatoires spatiaux pour surveiller le climat et, d'autre part, de faire dialoguer entre eux les scientifiques, les agences spatiales et les industriels. Le Dossier N°47 vise à faire la synthèse des présentations et des discussions qui y ont eu lieu et à émettre quelques recommandations.

Le problème posé se situe dans le contexte du changement climatique global. L'accord de Paris adopté en décembre 2015 vise à limiter le réchauffement climatique global à 2°C en réduisant drastiquement les émissions de gaz à effet de serre. Pour répondre à ce défi et évaluer l'efficacité des décisions prises, il est impératif de pouvoir mesurer avec précision ces émissions. Le sujet est complexe et nécessite la collaboration de spécialistes de multiples domaines scientifiques, le développement d'outils technologiques et le croisement avec les simulations des modèles numériques. Le spatial est au cœur de la surveillance du climat, plus de la moitié des variables climatiques essentielles définies par le Système mondial d'observation du climat ne pouvant être mesurées que depuis l'espace. Le spatial donne accès à une vision globale des concentrations de gaz à effet de serre et aux autres variables atmosphériques, les satellites sur orbite polaire couvrant rapidement l'ensemble du globe. Les mesures spatiales sont complétées par des mesures terrestres, maritimes, aéroportées.

Ce dossier résume les questions que se posent les scientifiques sur les processus mis en jeu dans les changements climatiques induits par l'augmentation des gaz à effet de serre, en particulier le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane (CH₄), l'état de l'art des technologies que les industriels développent pour l'observation depuis l'espace de ces constituants et les programmes que les agences spatiales mettent en œuvre pour

fournir aux scientifiques les données dont ils ont besoin sur le long terme pour prévoir l'évolution du climat.

Le colloque a permis de constater que les mesures spatiales actuelles n'ont pas la précision ni la couverture géographique et temporelle suffisantes pour estimer les sources (régions d'émission, par exemple les zones industrielles) et les puits (régions d'absorption, par exemple les océans pour le CO₂) des gaz à effet de serre. Cela nécessite de disposer de plusieurs satellites effectuant simultanément des mesures précises et bien étalonnées de la même variable. Ces mesures doivent s'inscrire dans un système complet incluant les réseaux d'observation depuis le sol et les inventaires des sources et des puits des gaz à effet de serre, afin d'alimenter les modèles globaux du système Terre. Cela nécessite une coopération accrue entre la communauté scientifique, les industriels et les agences spatiales. Il faudra s'efforcer avec l'aide de la communauté scientifique de formuler une feuille de route sur les priorités en termes d'acquisition de données d'observation, afin que les agences spatiales aboutissent à un plan stratégique cohérent avec ces priorités.



Anne-Marie Mainguy

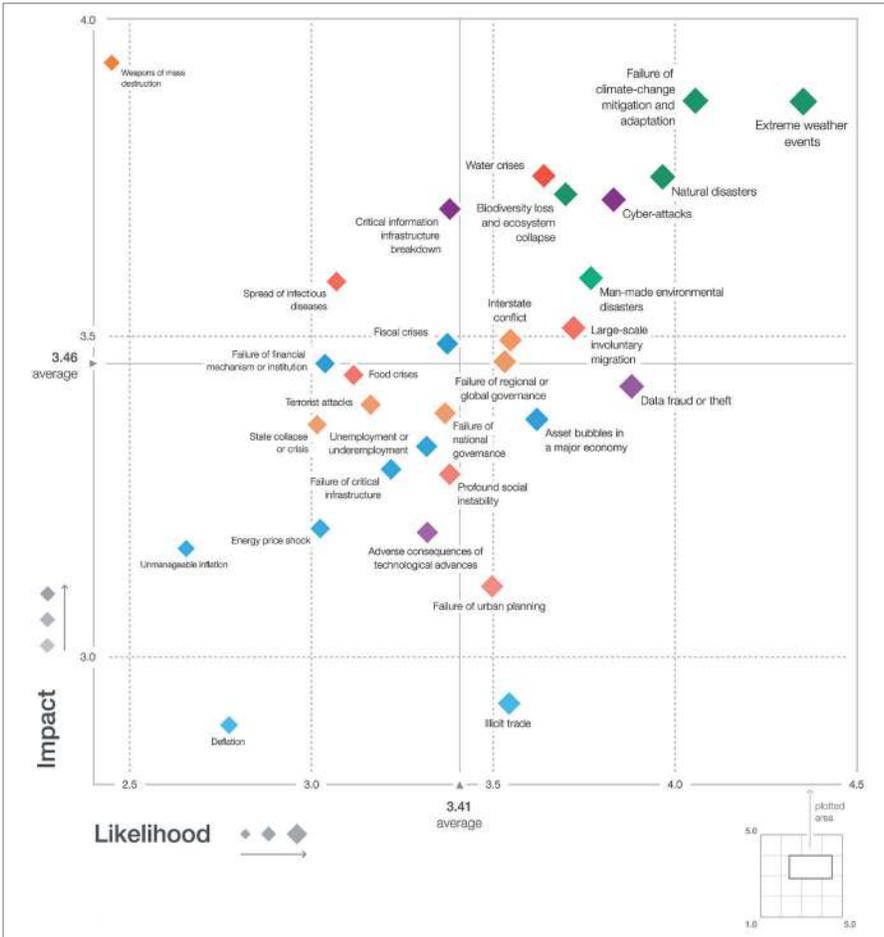
Présidente de l'Académie de l'air et de l'espace (AAE)

1 INTRODUCTION

La COP 21, qui a eu lieu en novembre et décembre 2015 à Paris, a été le point d'orgue d'une prise de conscience des États face au changement climatique et à ses graves conséquences pour notre planète. Alertés depuis des années par la communauté scientifique rassemblée au sein du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), ils ont semblé prendre la mesure du problème et des enjeux politiques et économiques que les variations climatiques entraînent (multiplication des catastrophes naturelles, aménagement des territoires, réfugiés climatiques, etc.). En 2016, le World Economic Forum Global a d'ailleurs placé l'échec de l'adaptation au changement climatique et de l'atténuation de ses effets en tête des risques globaux (Figure 1).

Lors de la COP 21, les gouvernants se sont engagés à réduire les émissions de gaz à effet de serre (Figure 2) dues à l'activité humaine, pour tenter de limiter la hausse des températures moyennes du globe à moins de 2°C en 2050 par rapport à 1900. Le défi est de taille et la tâche ardue, car – au-delà de la volonté politique qui depuis paraît malheureusement décliner – pour réduire les émissions anthropiques de gaz à effet de serre et évaluer l'efficacité des stratégies mises en œuvre, il faut pouvoir mesurer ces émissions avec précision. Ce qui représente un défi à la fois scientifique et technologique.

L'Académie de l'air et de l'espace (AAE) a souhaité prendre part à ce débat en organisant, les 10 et 11 octobre 2017 à Toulouse, un colloque centré sur l'apport du spatial pour aider à mieux comprendre et observer les phénomènes influant sur le climat, en particulier les principaux gaz à effet de serre que sont le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane (CH₄). En effet, le dérèglement climatique est un sujet complexe, qui demande la collaboration de multiples champs scientifiques et outils technologiques, le croisement de modèles divers et de mesures terrestres, maritimes, aéroportées et satellitaires (Figure 3). Le spatial joue un rôle important dans l'analyse, car la plupart des variables essentielles pour mesurer le climat (Essentiel Climate Variables, ou ECV), définies par le Global Climate Observing System (GCOS), ne peuvent être mesurées que depuis l'espace (Figure 6).



Intitulé « Le Climat a besoin d'espace », le colloque a réuni, sur le site de Météo France, des scientifiques européens et américains, des représentants d'agences spatiales (CNES, ESA, DLR, Eumetsat), des technologues et des industriels du secteur (CNES, ESA, Airbus et Thales Alenia Space).

Les scientifiques ont dit leur besoin de mesures fiables pour prédire l'évolution du climat, et montré la complexité des modèles d'analyse. Les instrumentalistes spatiaux ont exposé l'état de maturité des technologies utilisées ; les agences spatiales ont présenté les programmes qu'elles mettent en œuvre pour fournir la communauté scientifique en données de plus en plus précises sur le long terme. L'Europe a ainsi lancé le programme Copernicus avec les satellites Sentinelle.

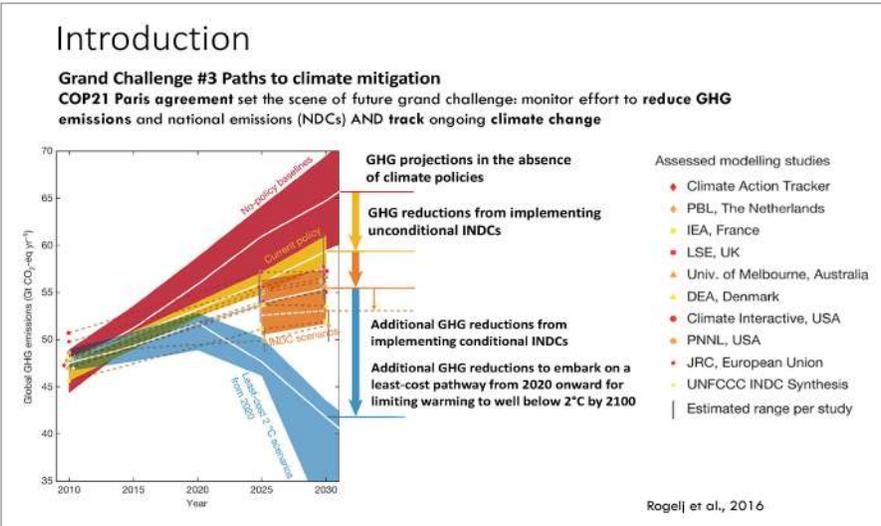


Figure 2 : Évolution des émissions globales de gaz à effet de serre résultant des engagements nationaux de réduction des émissions (INDCs), et nécessaire pour atteindre la limitation du réchauffement global en dessous de 2°C.

Source : Rogelj et al., 2016.

Météo France, lieu du colloque de l'AAE

Le lieu du colloque : Météo Pole de Météo France à Toulouse était approprié. La météorologie est aujourd'hui opérationnelle, elle a les mêmes problématiques que la climatologie avec en plus l'aspect temps réel et très court terme et elle regroupe les mêmes compétences comme la formation, la recherche, les fonctions opérationnelles et les réseaux d'observation. La prévision météorologique s'adapte en permanence en fonction des progrès de l'ingénierie spatiale et de la télédétection depuis l'espace. Les données météorologiques sont collectées très vite, il faut faire face à des défis de volume et de puissance de calcul pour intégrer tous ces éléments avec des modèles numériques de prévision du temps, de l'atmosphère, des océans, dans les surfaces continentales, dans la cryosphère. Aujourd'hui la météorologie prévoit le système Terre à court terme (cinq jours et plus) comme on peut le souhaiter. La prévision climatique le fera demain pour le long terme (mois, année, décennie).

2 CONTEXTE

L'accord de Paris adopté en décembre 2015 sur le climat vise à maintenir le réchauffement climatique en dessous de 2°C et à « poursuivre les efforts » en vue de le limiter à 1,5°C. Pour ce faire, les pays ont soumis des prévisions de contribution nationale à la réduction des émissions (INDCs pour *Intended Nationally Determined Contributions*), décrivant leur action climatique après 2020. Rogelj et al. (2016) ont évalué l'effet des INDCs actuels sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale et ses implications pour la réalisation de l'objectif de limitation du réchauffement global de l'accord de Paris. Les INDCs réduisent les émissions de gaz à effet de serre par rapport aux politiques actuelles mais impliquent néanmoins un réchauffement médian de 2,6 à 3,1°C d'ici à 2100 (Figure 2). Il est possible d'obtenir davantage. Pour avoir une chance raisonnable d'atteindre l'objectif de maintien du réchauffement en dessous de 2°C, il faudrait renforcer substantiellement les actions visant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

La rapidité du changement climatique actuel et la difficulté à adapter nos sociétés à ce changement rapide pour en atténuer les conséquences font courir un risque majeur. Le forum économique mondial évalue chaque année les risques sur l'économie mondiale de différents événements potentiels. Les deux risques majeurs ayant à la fois un impact fort et une probabilité élevée de se produire (Figure 1) sont deux risques environnementaux liés à l'évolution du climat, l'échec de l'adaptation au changement climatique et les événements météorologiques extrêmes dont la probabilité d'occurrence pourrait augmenter.

Les modèles de climat

Le système Terre

La Terre est un système dynamique intégré. Les échanges et transformations d'énergie induisent des changements à toutes les échelles de temps et d'espace. Il n'y a pas d'état

stable de notre planète ; sa perpétuelle évolution implique l'ensemble des phénomènes physiques, chimiques et biologiques dans l'atmosphère, l'océan et les surfaces continentales. Concernant le climat, de nombreux mécanismes de rétroaction (c'est-à-dire l'action en retour d'un système à la modification d'un paramètre) sont à l'œuvre, au travers notamment des nuages et de l'albedo (fraction de l'énergie solaire réfléchie vers l'espace par une surface). Ces mécanismes peuvent amplifier les effets induits par les variations d'énergie ou, au contraire, les amortir. L'humanité est une composante de l'écosystème terrestre, elle agit sur l'état de la planète en altérant les transformations d'énergie et en influant sur la composition de l'atmosphère à un rythme élevé, trop élevé pour permettre à la planète de s'ajuster grâce aux phénomènes naturels de rétroaction. L'analyse du système Terre et son évolution climatique est complexe. Elle a besoin de continuité de données, de précision, de modèles complexes et évolutifs. Elle s'appuie sur le traitement et retraitement de longues séries historiques ; la combinaison des inventaires d'émissions, des observations spatiales et terrestres, et des modèles de transport atmosphérique.

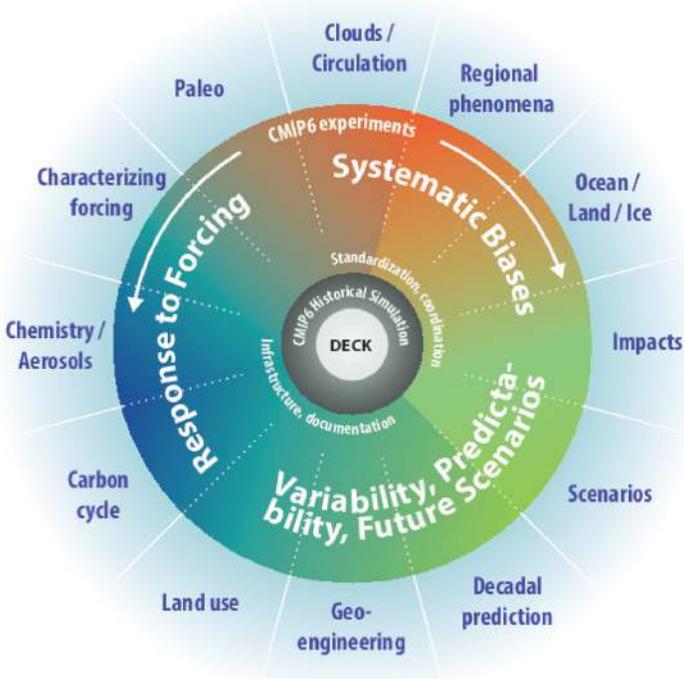


Figure 3 : Schéma de conception des simulations CMIP6. Les expériences CMIP DECK (diagnostic, évaluation et caractérisation du climat) et la simulation historique CMIP6 sont au cœur des activités. Les anneaux intermédiaires et extérieurs indiquent des sujets scientifiques pour lesquels des études spécifiques sont réalisées. Source : Eyring et al., 2016.

Sa modélisation

C'est tout l'objet des modèles de climat de représenter ce système, en intégrant toutes les interactions et réactions en chaîne qu'il comprend. La complexité de la modélisation des phénomènes physico-chimiques naturels ou anthropiques, qui sont en interactions permanentes et qui font évoluer le climat de notre planète Terre, est telle que plus de 40 modèles existent. Le schéma présenté sur la Figure 3 décrit de façon schématique l'organisation des simulations des modèles du système Terre réalisée dans le cadre du projet CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project) visant à réaliser des simulations climatiques de façon coordonnée entre les différents groupes de recherche. Ces simulations seront répertoriées et intercomparées dans l'évaluation de l'état des connaissances sur le climat réalisée pour le 6^e rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) dont la publication est prévue en 2021.

Ces modèles de climat prédisent des changements à un horizon de 50 à 100 ans, voire plus. La qualité de ces prévisions est donc difficile à vérifier. Cette incertitude doit être contrainte et les scientifiques ont pour ambition d'y arriver en caractérisant plus précisément les rétroactions multiples. D'autre part le réchauffement prévu à la fin du 21^e siècle dépend énormément du scénario supposé pour les émissions de gaz à effet de serre (Figure 4).

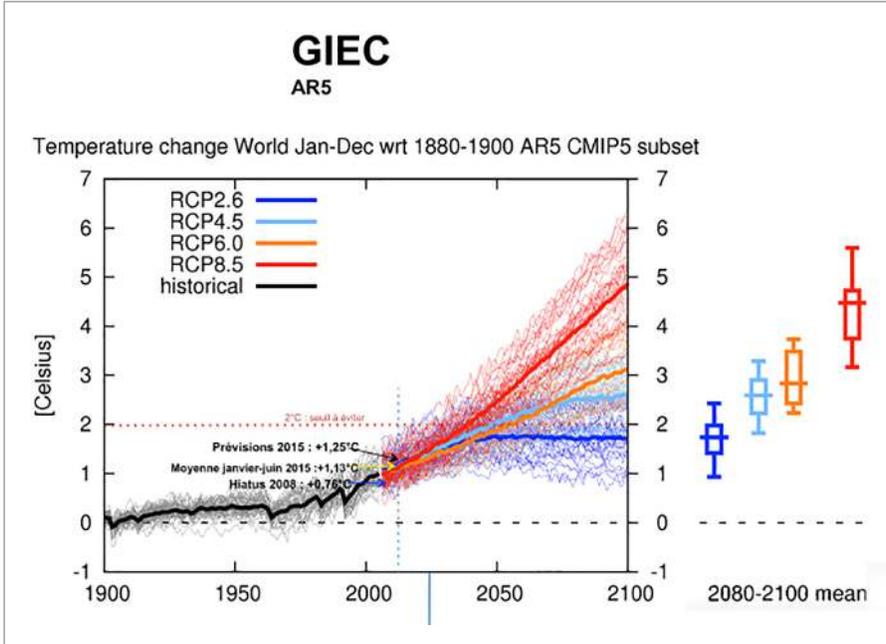
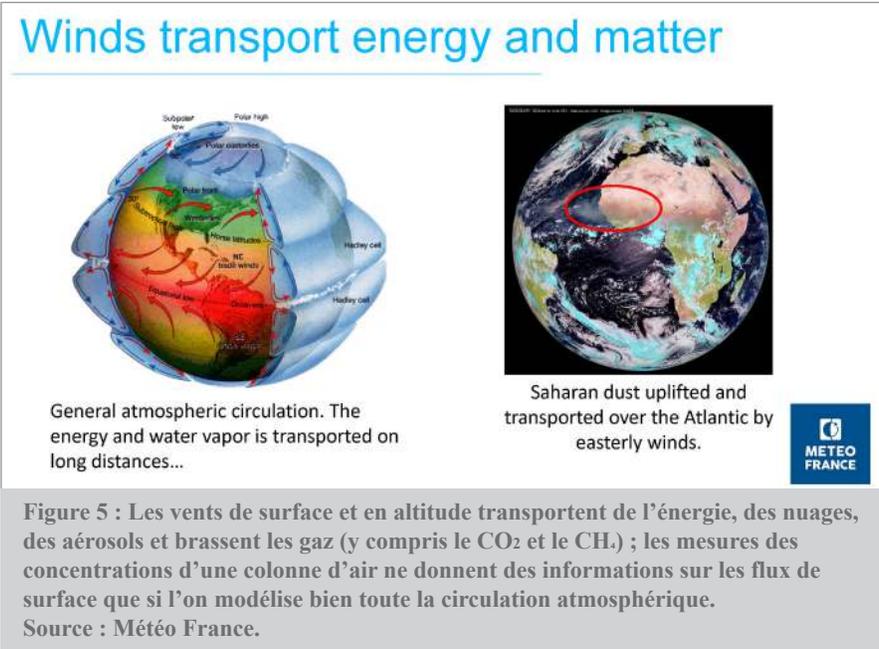


Figure 4 : Projections du 5^e rapport du GIEC d'élévation de température en fonction du scénario d'émission de gaz à effet de serre. Les barres d'erreurs indiquées à droite représentent la dispersion des résultats en fonction des modèles. Source : 5^e rapport du GIEC, 2014.

Chaque modèle a ses particularités et ses défauts, du fait de l'attention plus ou moins importante qu'il accorde à tel ou tel phénomène. Ainsi, certains modèles de transport atmosphérique vont très bien fonctionner dans une partie de la troposphère, mais plus du tout ailleurs. Cela va introduire des biais de mesure qui seront mélangés dans le calcul des flux de surface à partir de mesures de constituants intégrées sur la colonne totale (Figure 5).



Le programme international GCOS a été créé en 1982 dans le but de définir un système mondial d'observation du climat. L'une des premières actions du GCOS a consisté à identifier des variables climatiques nécessaires pour soutenir le travail du GIEC. Ces variables, dites « variables climatiques essentielles » (en anglais, *Essential Climate Variables*, ou ECV), sont actuellement au nombre de 54 et concernent l'atmosphère, l'océan et les surfaces continentales (Figure 6). Elles ont été choisies en raison de leur importance mais aussi parce qu'elles sont accessibles à l'observation systématique et à la production de séries de données homogènes sur une très longue durée. Parmi ces 54 variables, 50 % peuvent être fournies directement par des instruments spatiaux. Les 50 % restants se subdivisent en 2 : 25 % ont une composante spatiale, le reste devant venir d'observations au sol, ou d'observation terrestre. Donc 75 % des données indispensables pour mesurer ces variables climatiques essentielles sont dérivées de mesures satellitaires.

Une des conséquences du réchauffement global est la montée du niveau de la mer. Celle-ci est due à deux facteurs, la dilatation de l'océan sous l'effet de son réchauffement et la fonte des glaciers du Groenland, de l'Antarctique et de montagne. Les altimètres spatiaux (spécialité française) mesurent l'élévation du niveau des mers (3,17 mm/an sur la période 1992-2016, Figure 7) et comme l'océan contient 90 % de la chaleur anthropique accumulée depuis 50 ans on a là un bon traceur du réchauffement.

| Atmosphere | Land | Ocean |
|--|--|---|
| Surface | Hydrosphere | Physical |
| <ul style="list-style-type: none"> • Precipitation • Pressure • Radiation budget • Temperature • Water vapour • Wind speed and direction | <ul style="list-style-type: none"> • Groundwater • Lakes • River discharge | <ul style="list-style-type: none"> • Ocean surface heat flux • Sea ice • Sea level • Sea state • Sea surface currents • Sea surface salinity • Sea surface stress • Sea surface temperature • Subsurface currents • Subsurface salinity • Subsurface temperature |
| Upper-air | Cryosphere | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Earth radiation budget • Lightning • Temperature • Water vapor • Wind speed and direction | <ul style="list-style-type: none"> • Glaciers • Ice sheets and ice shelves • Permafrost • Snow | |
| Atmospheric Composition | Biosphere | Biogeochemical |
| <ul style="list-style-type: none"> • Aerosols • Carbon dioxide, methane and other greenhouse gases • Clouds • Ozone • Precursors for aerosols and ozone | <ul style="list-style-type: none"> • Above-ground biomass • Albedo • Evaporation from land • Fire • Fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FAPAR) • Land cover • Land surface temperature • Leaf area index • Soil carbon • Soil moisture | <ul style="list-style-type: none"> • Inorganic carbon • Nitrous oxide • Nutrients • Ocean colour • Oxygen • Transient tracers |
| | Anthrosphere | Biological/ecosystems |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Anthropogenic Greenhouse gas fluxes • Anthropogenic water use | <ul style="list-style-type: none"> • Marine habitats • Plankton |

Figure 6 : Tableau des 54 variables climatiques essentielles.
 Source : gcoss.wmo.int/en/essential-climate-variables

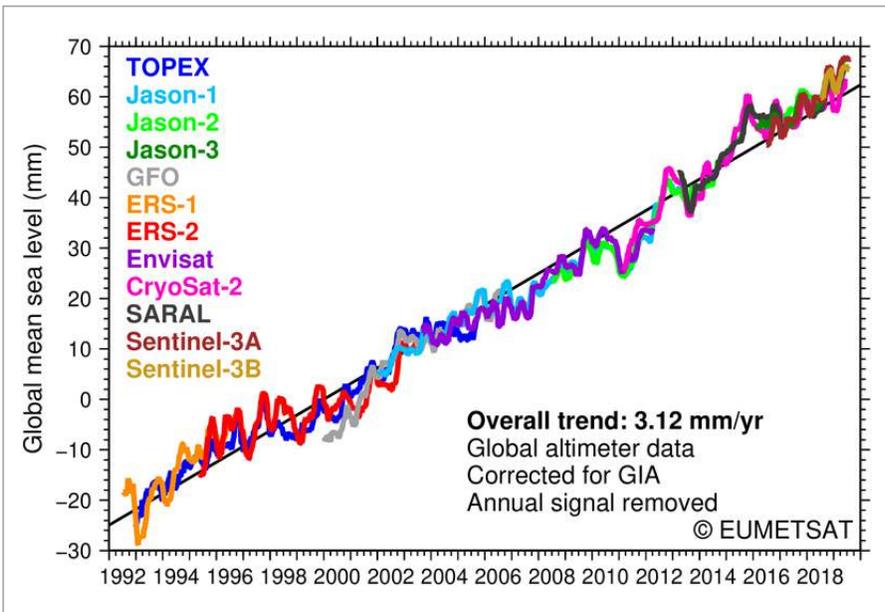


Figure 7 : Évolution du niveau de la mer mesurée par les altimètres spatiaux.
 Source : Eumetsat.

3 LES PRINCIPAUX GAZ À EFFET DE SERRE

La Terre bénéficie d'un effet de serre naturel indispensable à notre survie puisqu'il provoque une élévation de la température en surface. Ce fragile équilibre est cependant menacé par les activités humaines qui affectent la composition chimique de l'atmosphère et entraînent l'apparition d'un effet de serre additionnel, responsable en grande partie du changement climatique actuel. Les principaux gaz à effet de serre d'origine anthropique sont le dioxyde de carbone et le méthane, dont la présence dans l'atmosphère a augmenté respectivement de 40 % et 190 % en un siècle (Figure 8).

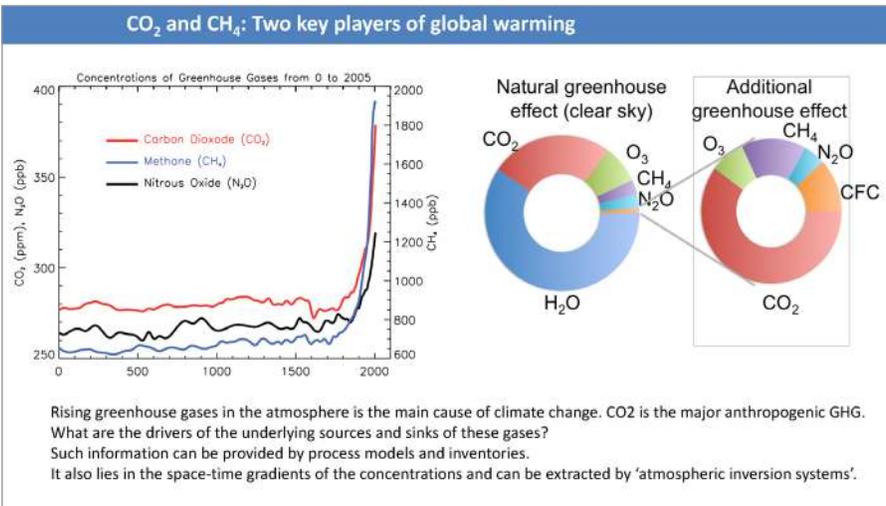


Figure 8 : Les augmentations des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère sont corrélées avec les fortes croissances des activités humaines source de ces gaz dans la même période. Source, C. Crevoisier.

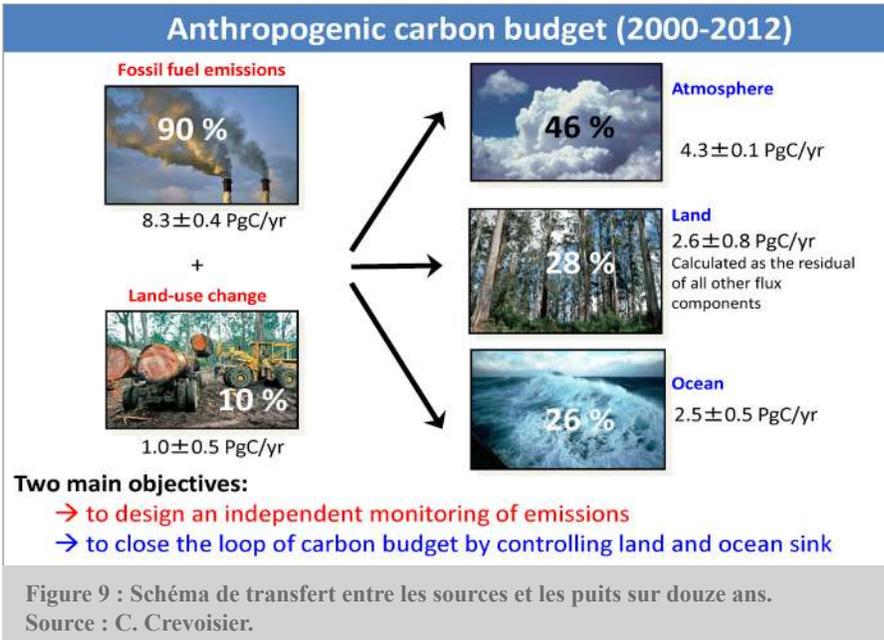
Le dioxyde de carbone

Caractéristiques, sources et puits

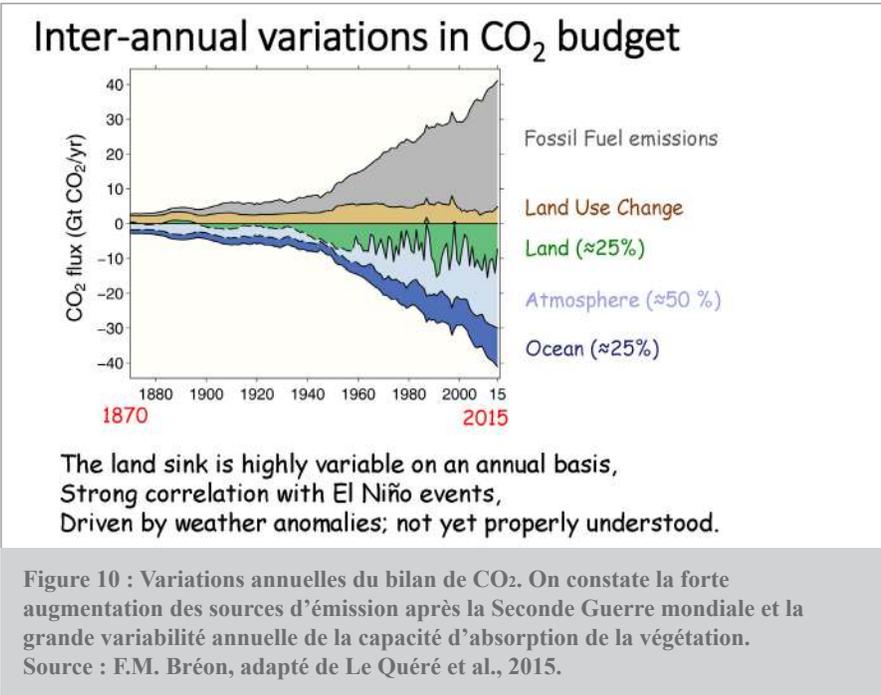
Le CO₂ est une molécule stable, peu affectée par la chimie de l'atmosphère terrestre. Sa concentration dans l'atmosphère augmente de manière continue, ce qui ajoute un effet de serre additionnel à l'effet naturel. Il est considéré comme le premier gaz à effet de serre anthropique. Dans le climat il y a toujours un aspect naturel et un aspect forcé par les activités humaines. L'effet de serre naturel est dû principalement à la vapeur d'eau et pour 26 % au CO₂. La contribution additionnelle ne représente qu'une petite partie de ce pourcentage. C'est là toute la difficulté, car lorsqu'on parle de perturbations dues à l'homme, on s'intéresse à de tout petits signaux par rapport à l'ampleur des cycles naturels.

Pour étudier la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, on utilise les inventaires d'émissions, les connaissances sur les sources et les puits de carbone, des modèles de transport et des observations. Deux zones d'ombre majeures empêchent de prévoir précisément la vitesse du changement climatique au XXI^e siècle : le comportement de la vapeur d'eau et des nuages, et la façon dont les flux et stocks de carbone vont réagir au changement climatique.

Les deux principales sources d'émissions anthropiques de carbone sont la combustion des fuels fossiles (90 % des émissions) et les changements d'utilisation des sols, telle la déforestation (10 %). Près de la moitié du CO₂ ainsi émis reste dans l'atmosphère, le reste est absorbé par ce qu'on appelle des puits en surface : les océans, à hauteur de 26 %, et les écosystèmes continentaux, 28 % (Figure 9). Cette dernière estimation fait



cependant l'objet d'une grande incertitude, car elle est obtenue par déduction. Ici, deux phénomènes se compensent en partie : la déforestation (via les feux de forêt) constitue une source de carbone rejeté dans l'atmosphère, tandis que la végétation elle-même, qui se nourrit de carbone, pompe le CO₂. La somme de ces deux effets agissant en sens contraire est très incertaine. Les meilleures estimations considèrent que durant la première moitié du XX^e siècle, la déforestation l'emportait, alors que la seconde moitié voyait l'effet puits de carbone prendre le dessus. On arriverait à un équilibre, et donc à un bilan neutre, en 2000 (Figure 10).



Pour étudier le rôle du CO₂ dans le changement climatique et comprendre quelle va être l'évolution de sa concentration dans l'atmosphère il est important de bien identifier et suivre les émissions anthropiques et naturelles et comprendre les puits associés au cycle du carbone, lesquels, finalement, contrôlent la quantité de CO₂ restant dans l'atmosphère. Pour faire cela on va utiliser des inventaires d'émission, des connaissances a priori sur les sources, les puits, des modèles de transport et des observations. La réponse des puits continentaux varie selon les événements climatiques comme El Niño et les anomalies météorologiques (Figure 11).

L'approche *top-down* (ou inversion atmosphérique) constitue un moyen d'améliorer la connaissance des puits et émissions de surface. On compare les simulations des champs 3D de la concentration du CO₂ (faites à partir des inventaires d'émission et de la connaissance des flux) aux observations disponibles (sol, aéroportées ou satellitaires), pour affiner les modèles de transport.

Winds interact with the ocean circulation

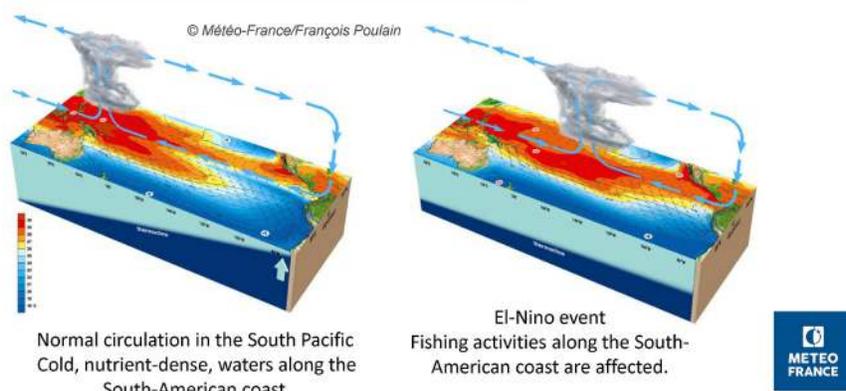
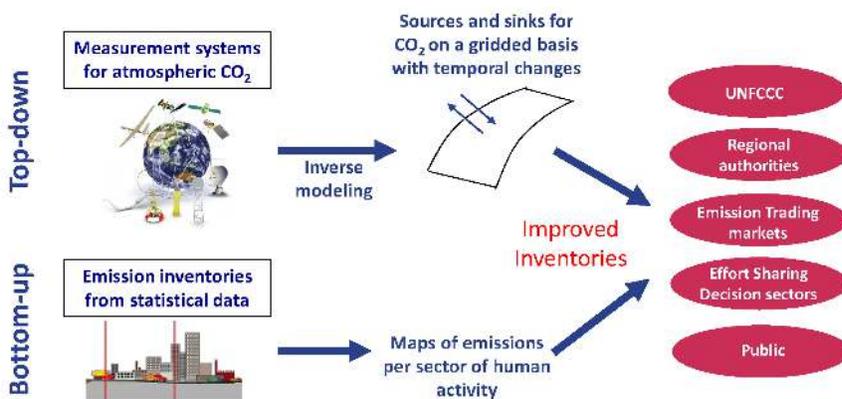


Figure 11 : Les grands phénomènes météorologiques comme El Niño modifient la circulation océanique et affectent sensiblement la concentration de CO₂ de l'atmosphère. Source : Météo France.

En suivant la concentration de CO₂ dans l'atmosphère et grâce au modèle de transport on peut remonter aux émissions et puits de CO₂ à la surface. (Figure 12).

Improving emission inventories

Improving emission inventories



Improved emission inventories and global sources and sinks by measuring CO₂ in the atmosphere and using inverse modeling will be useful to reduce uncertainties in the numbers at national scale, to help cities and regions to pursue and intensify their efforts and benefit from them, e.g. through market based instruments, and to better understand carbon cycle.

Figure 12 : L'inventaire des émissions est au centre de la problématique de suivi des efforts entrepris (ou pas) par les acteurs, il nécessite une modélisation fine du transport du CO₂ dans l'atmosphère. Source : C. Crevoisier.

Le satellite, un outil nécessaire mais pas suffisant

Il existe tout autour du globe de nombreuses stations de mesure du CO₂, qu'elles soient terrestres, maritimes ou aéroportées (par avions et ballons), mais certaines zones, comme les tropiques et les océans, sont peu couvertes. L'observation spatiale, pour sa part, apporte quantité de renseignements sur l'évolution des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère, et ce sur l'ensemble du globe. Elle permet aussi, plus localement, d'observer l'indice de végétation ou des dépôts de feux liés à la déforestation. Certaines missions opèrent dans le proche infrarouge (SWIR), d'autres dans l'infrarouge thermique (TIR). Mais la modélisation du transfert radiatif reste difficile, en ciel diffusant notamment, c'est-à-dire en présence d'aérosols et de nuages. Les satellites apportent des données précieuses, mais peu sur les hautes latitudes, et il y a des problèmes de biais de mesure.

Au-delà de l'instrument spatial lui-même, ce qui importe c'est la chaîne de traitement des données qui permet de passer des mesures brutes aux concentrations de CO₂ dans la colonne d'air. Car les mêmes observations satellitaires traitées selon des méthodes différentes n'arrivent pas aux mêmes résultats, ce qui a une incidence sur l'estimation des flux. La calibration et la validation des traitements sont indispensables au niveau international.

En définitive, le satellite constitue un bon outil d'observation et de mesure pour le suivi du CO₂. Mais ne pouvant répondre à tous les besoins, il est à penser comme un élément constitutif d'un système d'observation complet, en complément de solides infrastructures terrestres. Il faut une synergie entre les différents réseaux d'observation. Les réseaux de surface et dans la basse atmosphère sont nécessaires pour la calibration absolue et le long terme. Les mesures par avion aident à la validation satellite spécifique dans certaines zones atmosphériques et à l'amélioration des modèles de transport. Cela aussi bien pour le dioxyde de carbone que pour le méthane.

La difficile mesure des émissions anthropiques

Les satellites, depuis l'espace, mesurent la colonne totale de CO₂ présente dans l'atmosphère. Il est très difficile, à partir de ces données globales, d'extraire un signal émis au niveau du sol. Le niveau de précision requis pour parvenir à mesurer les émissions anthropiques représente un défi technique majeur (Figure 13). En effet, alors que la concentration totale de CO₂ dans l'atmosphère varie entre 380 parties par million (ppm) et 410 ppm, celle liée aux émissions anthropiques varie de l'ordre de - 4 à + 4 ppm. On parle donc d'un signal extrêmement faible à détecter à l'intérieur de mesures globales qui intègrent la variation du CO₂ tout le long de la verticale. Il n'est ainsi pas évident, à partir de données satellitaires, de voir la forte différence de concentration en CO₂ qui existe pourtant en surface entre une zone urbaine et une zone forestière. On estime que les biais systématiques associés à ces mesures devaient être inférieurs à 1,25 pour 1000. Il faut donc des outils de haute résolution (Figure 14).

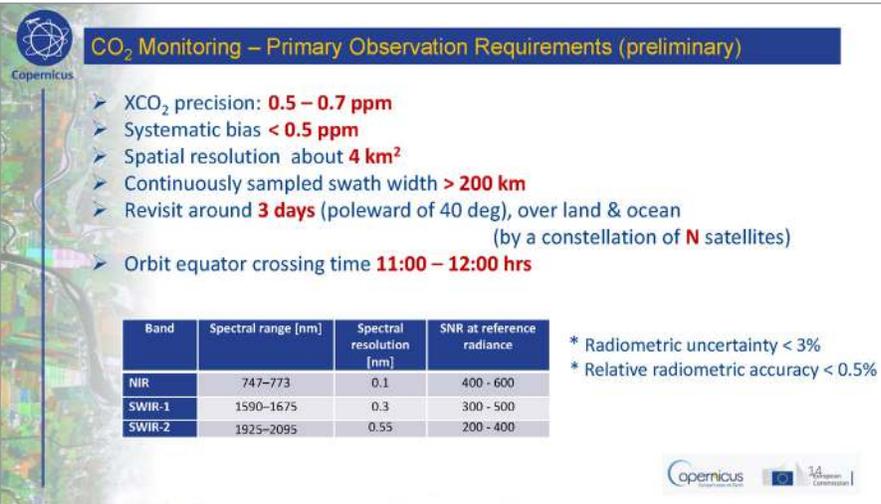


Figure 13 : Spécifications requises pour un système satellitaire permettant le contrôle des émissions anthropiques de CO₂.

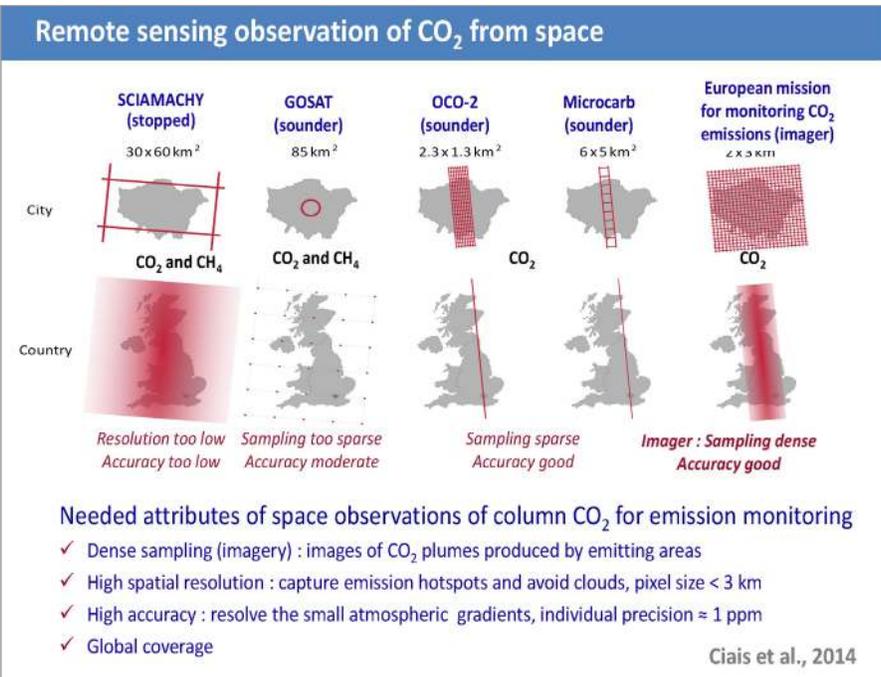


Figure 14 : Les programmes spatiaux (passé - Sciamachy ; présents - GOSAT et OCO-2 ; futurs – Microcarb et EU-CO₂) pour la mesure de CO₂.

Le programme européen Copernicus envisage un outil spatial, composé de trois satellites, mesurant la colonne de CO₂ (ainsi que le méthane) avec une précision de l'ordre de 0.5 - 0.7 ppm, un biais systématique < 0.5 ppm, une résolution d'environ 4 km² et un balayage de 180 km (Figure 15).

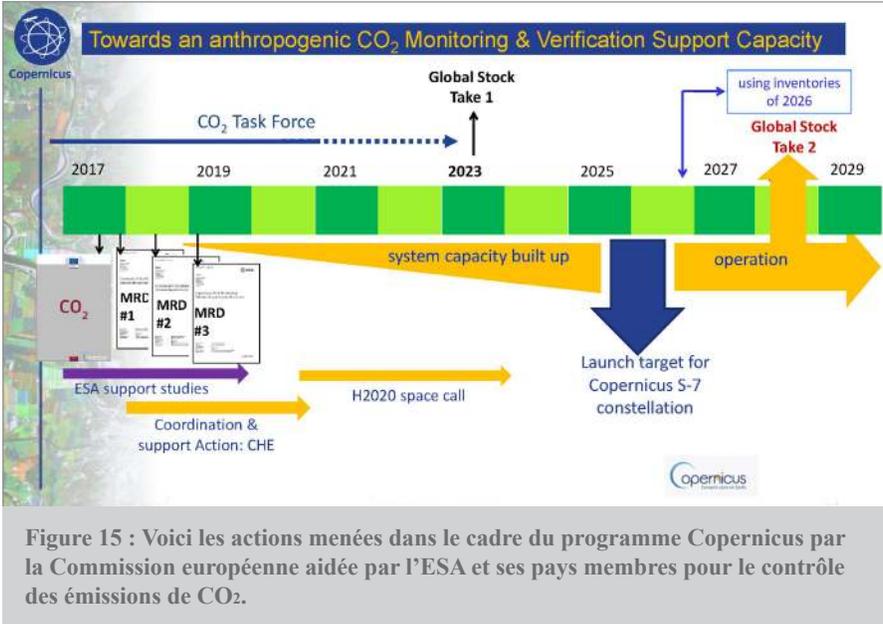


Figure 15 : Voici les actions menées dans le cadre du programme Copernicus par la Commission européenne aidée par l'ESA et ses pays membres pour le contrôle des émissions de CO₂.

Des impératifs politiques

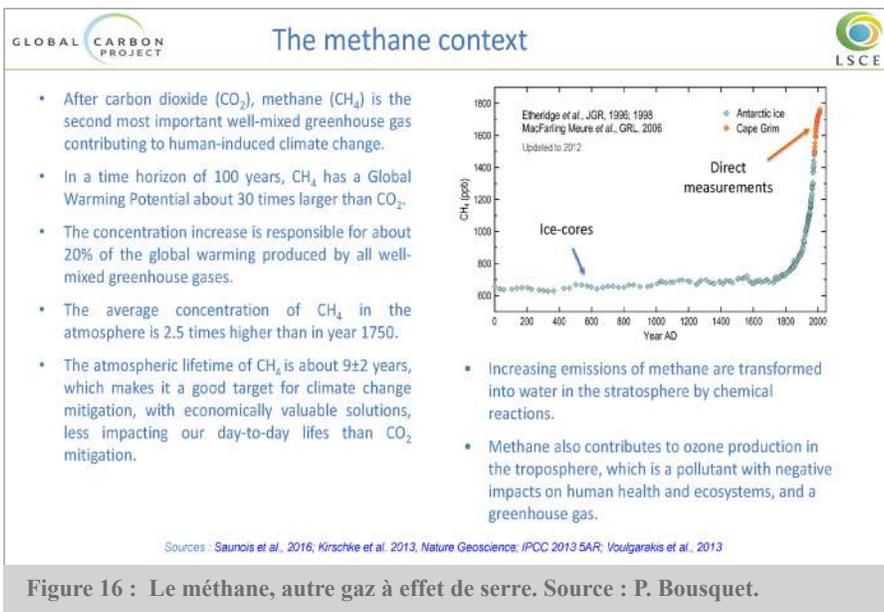
Les Accords de Paris prévoient un bilan des quantités de carbone au niveau mondial tous les cinq ans (en 2023 et 2028), afin de vérifier l'impact et l'efficacité des stratégies mises en œuvre par les États pour réduire les émissions anthropiques de CO₂ dans l'atmosphère. Il n'y a cependant rien de contraignant, aucun organe supranational ne comptabilisera depuis l'espace les émissions de chaque pays. Les États se sont seulement engagés à vérifier leurs propres inventaires. Or ces dernières années l'incertitude augmente concernant les inventaires d'émissions de CO₂ rapportés annuellement par les pays émergents, en particulier la Chine.

En vue de ces bilans mondiaux, la composante climat du programme Horizon 2020 de l'Union européenne regroupe les partenaires européens afin de rassembler et exploiter toutes les données disponibles, in situ comme satellitaires. Le système de suivi s'appuie sur la détection des hot-spots (fortes émissions provenant des méga-cités et des usines), l'observation des émissions (augmentation ou réduction), l'évaluation des dispositifs mis en œuvre par les pays, l'incidence sur les bilans carbone globaux.

Le méthane

Caractéristiques

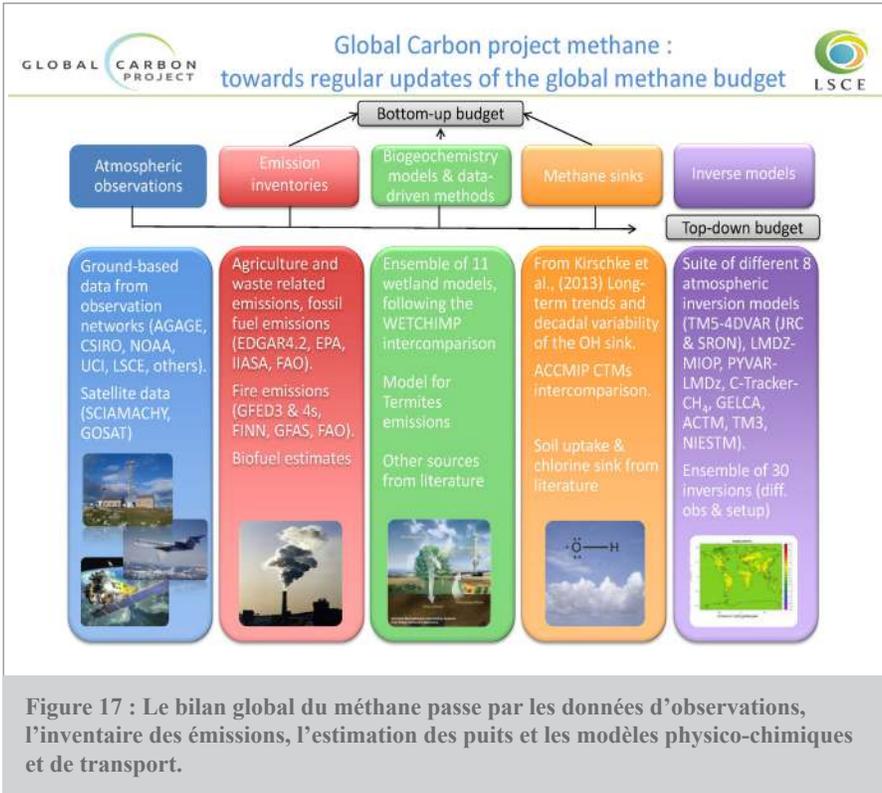
Pour limiter la hausse de la température à 2°C, il faut attaquer tous les gaz à effet de serre d'origine anthropique, et non se contenter du seul CO₂. Le méthane (CH₄) est une cible moins compliquée. Deuxième gaz à effet de serre d'origine anthropique, il est responsable, par ses concentrations, d'à peu près 20 % du réchauffement climatique. Sa part anthropique est à plus de 60 % aujourd'hui, sa durée de vie de ~9 ans (Figure 16).



Les puits atmosphériques enlèvent environ 90 % du méthane présent dans l'atmosphère. Les zones humides constituent sa principale source d'émission naturelle, les premières sources d'émissions anthropiques sont l'extraction des combustibles fossiles et les fuites de gaz naturel qu'elle peut entraîner, l'agriculture et les déchets.

Les bilans de méthane

Un effort de synthèse des bilans de méthane (synthèses ascendantes ("bottom-up") ou descendantes ("top-down")) est fait au niveau international (Figure 17). Le total des émissions avoisine les 560 millions de tonnes (téragrammes (Tg)) par an (vision descendante). Il y a tout de même de grosses incertitudes concernant ces flux, y compris dans la partie anthropique. La vision ascendante avance le chiffre de 730 Tg (non contraint par l'atmosphère) mais, contrairement au CO₂ pour lequel les inventaires sont précis à environ 5 %, il y a de grosses incertitudes y compris sur la partie anthropique et donc une amélioration de notre connaissance des sources est à rechercher.



Un problème majeur vient de la coexistence de plusieurs classifications, chaque communauté scientifique (celles qui étudient les lacs, les zones humides, les rivières ou les barrages) ayant constitué la sienne. Il y a donc, dans les inventaires globaux, un risque de double comptage. Il faudrait travailler sur l'harmonisation des classifications. Les zones humides présentent une autre difficulté, car toutes ne sont pas des écosystèmes avec des plantes adaptées ("*wetlands*") ; de même toutes les zones humides ne sont pas inondées. Cela pose des difficultés pour la détection des zones humides depuis l'espace. Enfin de grandes incertitudes planent sur l'évaluation des émissions de méthane provenant des sources géologiques.

Les bilans de méthane à l'échelle régionale présentent eux aussi d'importantes incertitudes. Pour les réduire il faut sans cesse faire des allers et retours entre inventaires, inversion et utilisation des données terrestres et spatiales.

Il est également important de comprendre les évolutions récentes de la concentration de méthane dans l'atmosphère qui montrent une stagnation dans les années 2000 puis une augmentation qui s'est accélérée à partir de 2014-2015. Les estimations données par les visions descendantes et ascendantes se rejoignent au niveau global, mais divergent au niveau régional, comme pour chaque processus (les zones humides, les autres sources naturelles, l'agriculture et les déchets, la biomasse, la combustion de biomasse,

le fuel fossile) (Figure 18). De grosses incertitudes existent au niveau régional sur les sources et les puits de méthane comme par exemple en Arctique avec la fonte du permafrost qui pourrait relâcher une quantité importante de méthane dans l'atmosphère mais dont on ne connaît pas l'amplitude.

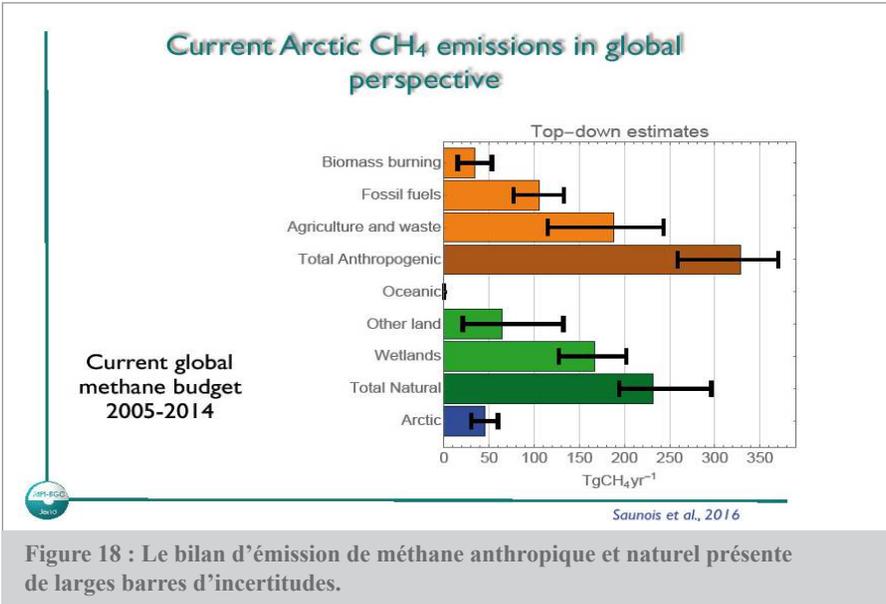


Figure 18 : Le bilan d'émission de méthane anthropique et naturel présente de larges barres d'incertitudes.

L'analyse des puits de méthane et des variations du radical hydroxyle OH (élément présent dans l'atmosphère qui contribue à absorber le méthane) est elle aussi compliquée. Les modèles de transport permettent de passer des émissions aux concentrations. Mais ils sont complexes, peu satisfaisants dans la stratosphère et pas toujours en accord les uns avec les autres. Comme les scientifiques aiment à souligner : les biais de mesure tuent.

Observations d'autres variables atmosphériques

Pour bien comprendre le rôle des gaz à effet de serre dans le climat il est également nécessaire d'observer et de modéliser l'évolution d'autres variables atmosphériques telles que la vapeur d'eau, les nuages, les aérosols et le vent qui interagissent également avec le climat. Le spatial a également une contribution essentielle à la mesure de ces variables.

Vapeur d'eau, nuages

Pour bien comprendre comment la modification du cycle du carbone influera sur le climat, il faut également observer, prédire et comprendre le cycle de l'eau et des nuages. Les deux cycles sont étroitement liés. La vapeur d'eau est le premier gaz à effet de serre naturel dans l'atmosphère. Le réchauffement atmosphérique dû à l'augmentation des gaz à effet de serre induit une intensification de l'évaporation à la surface et donc un effet

de serre additionnel de la vapeur d'eau. D'autre part il modifie le cycle de formation et de disparition des nuages avec, suivant les cas, des rétroactions positives ou négatives pour lesquelles il existe encore de grosses incertitudes. Les nuages élevés vont avoir une rétroaction positive en bloquant le rayonnement infrarouge émis par la surface et l'atmosphère alors que les nuages bas vont avoir une rétroaction négative en réfléchissant une partie du rayonnement solaire mais on ne sait pas comment la fréquence de ces deux catégories de nuages va évoluer avec le changement climatique.

La circulation atmosphérique peut être perturbée par ces modifications, et parfois un petit changement de cette circulation de quelques degrés de latitude peut se traduire par de forts effets en termes de pluie, par exemple avec les grandes sécheresses au Sahel, qui étaient imputables à une légère modification de la circulation en termes de latitude. Donc si l'on veut évaluer cela, il faut comprendre ce qui contrôle la position, la permanence, la variabilité de ces zones pluvieuses tropicales.

Au cours des dernières années les scientifiques se sont rendu compte qu'il y avait une forte sensibilité aux interactions et au couplage entre nuages et circulation. On découvre maintenant, que ce ne sont pas seulement les nuages en haut de l'atmosphère qui ont une influence, mais aussi que les nuages rafraîchissent l'atmosphère tout le long de la colonne, ce que l'on peut observer seulement depuis que nous disposons d'informations sur la distribution verticale des nuages, grâce au lidar du satellite CALIPSO.

Il ne faut pas seulement s'intéresser au réchauffement global mais également au renforcement des événements météorologiques extrêmes qui en résultera. Par exemple il est important de prévoir les épisodes de tempêtes tropicales et d'évaluer comment ces épisodes peuvent changer à l'avenir. L'ingrédient fondamental dans la genèse des tempêtes tropicales est l'évaporation en surface des océans. Il faut pouvoir quantifier cette évaporation, pour cela il faut aussi quantifier la vitesse des vents. Ce que l'on voit aussi c'est que la vapeur d'eau dans les zones humides, mais aussi dans les zones sèches, peut être importante dans la genèse des tempêtes.

Une autre question importante est de savoir quel va être le rythme et l'ampleur de ce réchauffement climatique dans les prochaines décennies. Ce rythme dépend non seulement de l'évolution des émissions de gaz à effet de serre à l'avenir mais également de la sensibilité climatique, qui s'exprime souvent par l'augmentation de température moyenne à la surface pour un doublement du CO₂ atmosphérique. Il y a beaucoup d'incertitudes sur cette sensibilité climatique du fait des incertitudes sur les rétroactions positives ou négatives des nuages et des aérosols. Les études d'adaptation sont influencées par ces incertitudes.

Nous pouvons formuler deux recommandations :

- La première consiste à disposer de profils de nuages à long terme, homogènes et reposant sur les données satellitaires. Il est important d'avoir des informations verticales sur la répartition des nuages pour gérer la modification de cette répartition au fil du temps.
- La deuxième consiste à améliorer la mesure des profils de vapeur d'eau dans les basses couches des atmosphères tropicales. C'est très important si l'on veut pouvoir

contrôler l'évolution du mélange vertical des vapeurs d'eau troposphériques basses qui sont des facteurs très importants dans la rétroaction des nuages bas.

Aérosols

Les aérosols ont des effets très importants sur la météorologie et le climat parce qu'ils vont jouer à la fois sur le rayonnement et les nuages. Les aérosols vont absorber ou diffuser le rayonnement solaire incident, c'est ce qu'on appelle l'effet direct, mais ils vont également en absorbant ce rayonnement modifier des propriétés de l'atmosphère, cela va pouvoir amener des ajustements de la couverture nuageuse. C'est ce qu'on appelle les effets semi-directs.

Le 5^e rapport du GIEC a évalué la contribution de chacun des facteurs au forçage radiatif global (Figure 19). Deux lignes concernent les aérosols. La première concerne

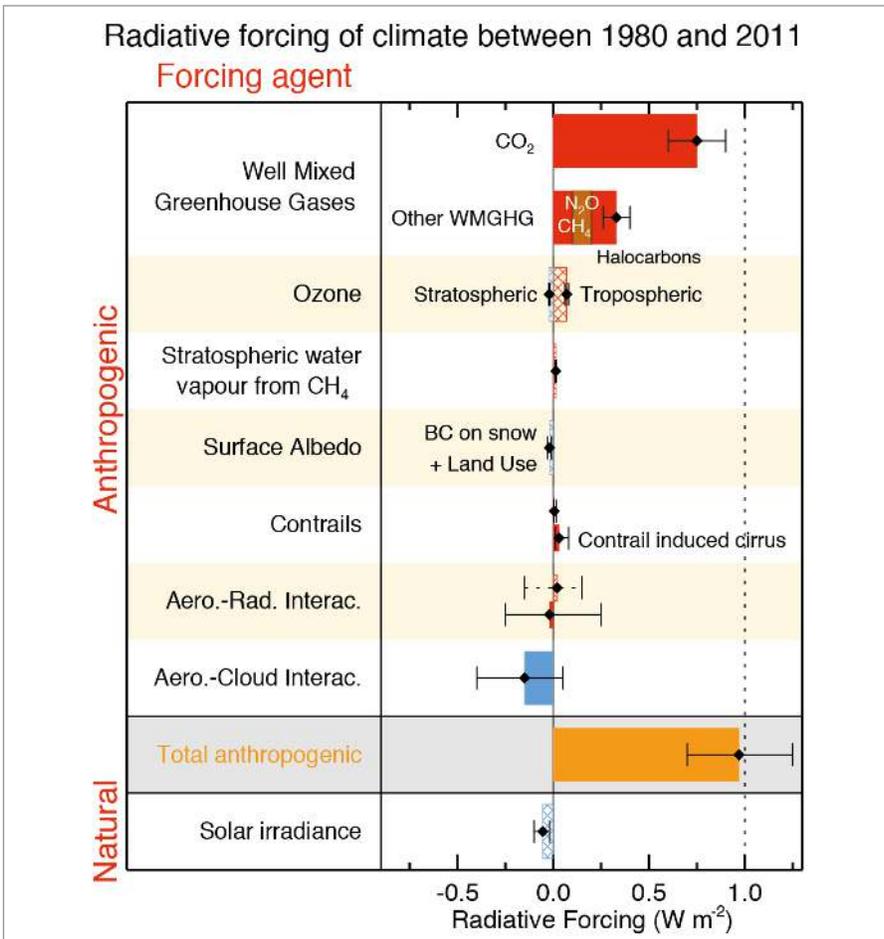


Figure 19 : Forçage radiatif sur la période 1980-2011 dû aux activités humaines. Les barres d'erreur représentent l'intervalle de confiance 5 à 95 %. Source : 5^e rapport sur le changement climatique du GIEC, 2014.

les effets directs de l'interaction aérosol/rayonnement qui sont plutôt négatifs. La deuxième concerne les effets indirects dus aux interactions des aérosols avec les nuages qui sont également négatifs. Donc les aérosols contrebalancent en partie les effets des gaz à effet de serre, mais les incertitudes sont beaucoup plus grandes que celles des gaz à effet de serre. On a donc besoin de mieux contraindre l'effet des aérosols sur le climat.

Les données des satellites vont servir à évaluer les modèles de climat sur des périodes passées. Les modèles de climat globaux sont utilisés pour effectuer des simulations multi-décennales mais dont la résolution ne permet pas de représenter tous les processus. Pour cela on utilise des modèles régionaux de climat qui nous permettent de descendre à des résolutions de quelques kilomètres qui servent à ajuster la représentation des processus de petite échelle de manière plus précise.

Vent

La première raison pour laquelle il faut s'intéresser au vent, y compris pour le climat, est qu'il s'agit d'une variable primaire de l'atmosphère. Quand on s'intéresse à l'atmosphère, les premières choses qu'on va chercher à caractériser, ce sont les champs de pression, qui donnent les dépressions et les anticyclones, de température et d'humidité et également les champs de vent. Ces différentes variables sont liées entre elles par les équations de la dynamique des fluides et de la thermodynamique.

La deuxième raison est que le vent a un effet, pas forcément néfaste, sur les activités humaines. Les cyclones génèrent des vents violents qui créent d'importants dégâts. Le vent perturbe également certaines activités notamment le transport aéronautique par exemple au moment de l'atterrissage des avions. La météorologie s'est beaucoup développée avec l'aéronautique et pendant très longtemps Météo France dépendait de la navigation aérienne en France. Le vent est également utilisé comme source d'énergie avec les éoliennes. Comme le vent a un effet sur les activités humaines, il y a un intérêt à le prévoir le plus possible à l'avance, pour se protéger et mettre en œuvre des moyens de sécurité civile.

Le vent c'est ce qui transporte l'énergie et la matière. On peut donner deux exemples :

- Les poussières désertiques qui ont été générées au Sahara peuvent être transportées à long distance vers l'Europe et l'Atlantique par les vents dans la haute troposphère. Mais pour qu'il y ait production d'aérosols, il faut qu'il y ait arrachement de poussières de la surface et qu'il y ait des vents suffisamment forts. Donc il faut connaître les vents précisément à la surface dans ces régions-là où il y a très peu d'observations.
- Autre exemple, le phénomène El Niño qui se produit dans le Pacifique au large de la côte ouest de l'Amérique du Sud. En temps normal les vents soufflent de l'Amérique vers le Pacifique et poussent les eaux chaudes de surface vers l'Indonésie et puis par compensation il y a des remontées d'eaux froides le long des côtes de l'Amérique du Sud. De temps en temps le vent est moins fort et les remontées d'eau froide n'ont plus lieu. C'est catastrophique pour l'activité de pêche au large des côtes d'Amérique du Sud, et cela provoque des variations climatiques dans d'autres régions du globe.

Pour comprendre ces phénomènes on a besoin de mesures précises du vent de surface.

La mesure directe du vent depuis l'espace n'est pas aisée. Actuellement les deux sources spatiales d'information sur le vent sont des mesures indirectes, d'une part les mesures radar de la rugosité de la surface de l'océan proportionnelle au vent de surface (diffusiomètres ASCAT sur les satellites MetOp) et d'autre part ce qu'on appelle les AMV (Atmospheric Motion Vectors) qui consistent à déduire la vitesse du vent du déplacement des nuages sur les images MeteoSat.

Le présent et le futur, c'est la mesure directe du vent par lidar. La mission Aeolus, lancée par l'Agence spatiale européenne en août 2018 pour une durée de vie de principe de trois ans, est le premier lidar Doppler dans l'espace. C'est un démonstrateur dont l'objectif est de démontrer l'apport des mesures de vent par lidar à l'amélioration des prévisions numériques du temps. Les résultats préliminaires d'assimilation des mesures de vent d'Aeolus dans le modèle de prévision du temps d'ECMWF sont encourageants et montrent un apport réel de ces mesures, principalement en région tropicale (Figure 20).

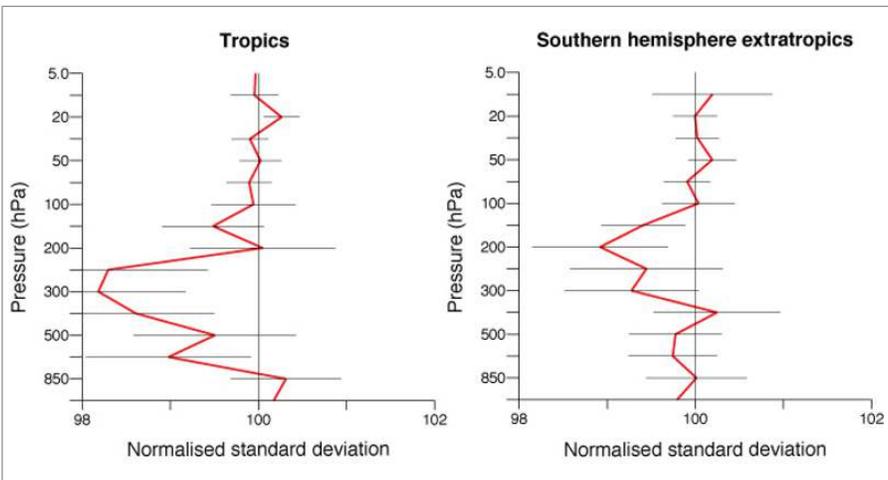


Figure 20 : Changements relatifs dans les erreurs de prévision de la vitesse du vent sur 12 heures, par rapport aux données de radiosondage et de profileur de vent, lorsque les données Aeolus sont utilisées pour aider à déterminer les conditions initiales. Des valeurs inférieures à 100 % signifient un meilleur ajustement aux observations. Les barres horizontales indiquent des intervalles de confiance de 95 %. Les expériences couvrent la phase de mise en service d'Aeolus du 12 septembre 2018 au 12 janvier 2019.

Source Michael P. Rennie et al., ECMWF, 2019.

Pour résumer, les données des satellites sont essentielles pour évaluer les modèles ; pour mieux exploiter ces données spatiales il faudrait essayer d'améliorer leur homogénéité sur des longues périodes, peut-être créer des produits mieux adaptés aux modèles de climat, grâce notamment à leur couverture spatiale et temporelle.

Le rôle du spatial

Pour comprendre notre planète, il est nécessaire de l'observer dans son ensemble et à toutes les échelles. Les données fournies par les satellites servent à affiner, évaluer et complexifier les modèles qui permettent d'étudier l'effet du changement climatique, notamment sur le cycle saisonnier du carbone.

Les scientifiques ont besoin de moyens de calcul de haute performance pour à la fois traiter des données satellitaires de plus en plus haute résolution et complexes, et des résultats de modèles toujours plus étoffés, incluant les effets du vent, des nuages et des aérosols tout le long de la colonne d'air. Il est primordial que la communauté spatiale puisse fournir ou rendre accessibles les données, et assurer des missions continues et homogènes.

Il faut perfectionner la couverture satellitaire, la précision des mesures et donc des instruments, toute l'algorithmie qui permet d'exploiter ces observations, et limiter le plus possible les importants biais systématiques. De même, les modèles d'inversion doivent être améliorés, ainsi que les modèles de transport atmosphérique à haute résolution.

Les instruments de mesure embarqués dans les satellites en orbite basse (600 à 2000 km) ou géostationnaire (36 000 km) sont soit actifs soit passifs.

Les instruments passifs mesurent et analysent le spectre de la lumière solaire réfléchie ou rétrodiffusée par la Terre (Figure 21). Ils donnent ainsi accès à une multitude de variables climatiques telles que l'irradiance solaire, le bilan radiatif de la Terre, la température de l'atmosphère, la vapeur d'eau, l'ozone, la nébulosité, les aérosols, les précipitations, le dioxyde de carbone, le méthane, la composition chimique de l'atmosphère, la couverture végétale et forestière, la couverture neigeuse et glaciaire, la salinité et la température de surface des océans. Ce sont des spectromètres, souvent associés à des

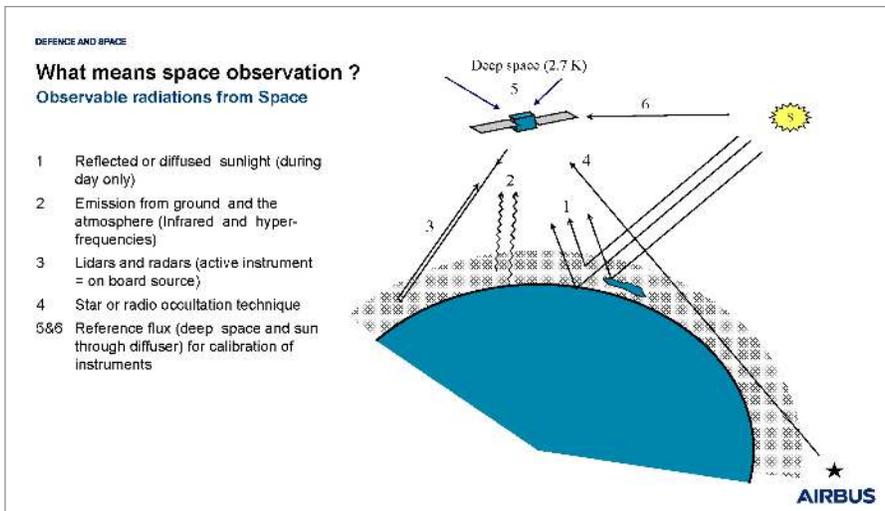
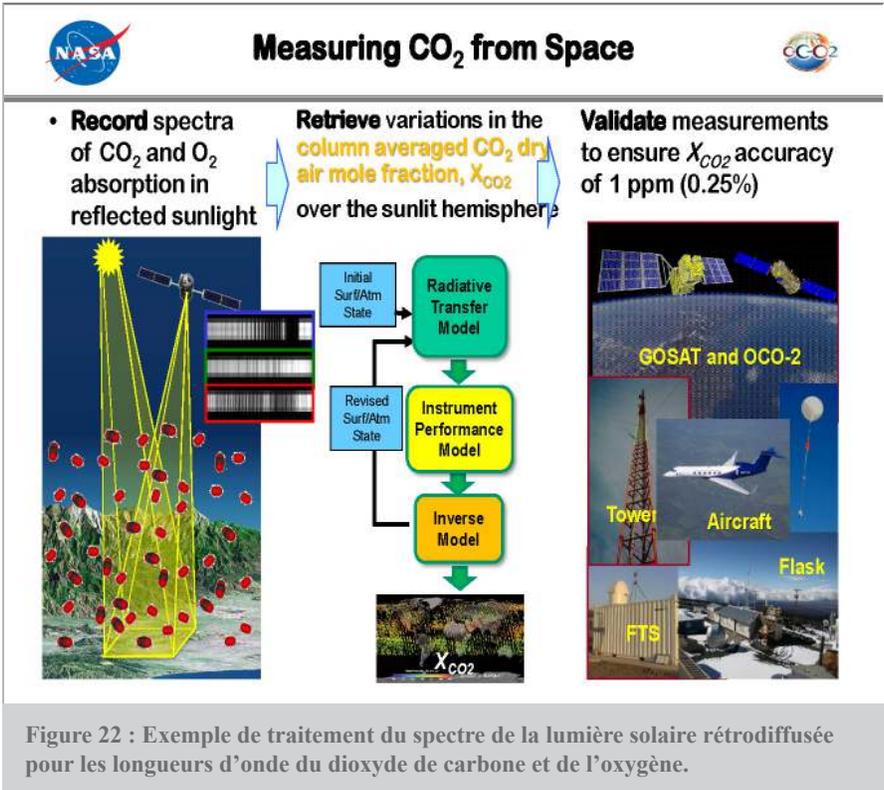


Figure 21 : Les différents types d'instruments spatiaux.



imageurs, possédant de très nombreux canaux spectraux, ou des spectro-interféromètres (à l'exemple de IASI), capables de couvrir une large bande spectrale.

Les instruments actifs mesurent et analysent l'écho de l'onde électromagnétique qu'ils ont émise après qu'elle a traversé deux fois tout ou partie de l'atmosphère. Ils renseignent, selon les longueurs d'ondes utilisées, sur des variables climatiques comme la chimie de l'atmosphère, les courants marins, le niveau des mers, l'intensité et la direction des vents marins, l'humidité des sols, l'altitude des nuages, les taux d'humidité, la topographie des sols et des glaces, etc. Des instruments actifs de type lidar sont émergents dans le spatial. De par leur nature, le spectre rétrodiffusé en réponse à la télédétection par laser est étroit, donc associé à l'élément aérosol ou gaz particulier que l'on veut observer.

La météorologie utilise l'outil spatial depuis plus longtemps que la climatologie. Bien qu'elle s'intéresse moins au dioxyde de carbone et au méthane, puisqu'ils interfèrent très peu à court terme, elle dispose de longues séries temporelles de mesures utilisables pour l'étude du climat. Ces instruments aussi peuvent servir d'exemple, tels les sondeurs IASI (Interféromètre atmosphérique de sondage infrarouge), montés sur les satellites MetOp d'Eumetsat, qui, primordiaux pour les prévisions météorologiques, constituent aussi une référence pour beaucoup de sondeurs spatiaux (Figure 23).

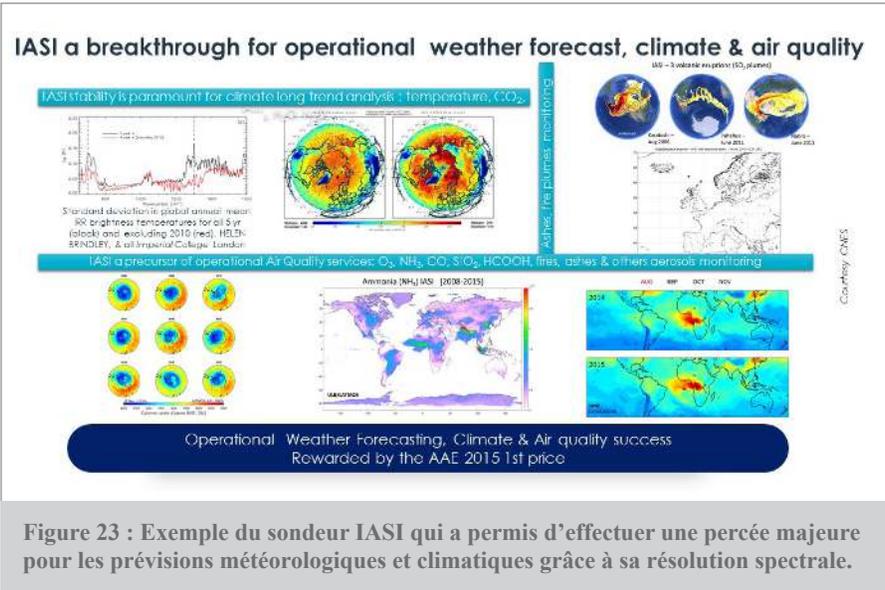


Figure 23 : Exemple du sondeur IASI qui a permis d'effectuer une percée majeure pour les prévisions météorologiques et climatiques grâce à sa résolution spectrale.

Pour autant les mesures ne suffisent pas, il faut pouvoir les valider, les calibrer et les inter-calibrer. L'effort doit également porter sur les modèles d'inversion pour fournir à la communauté scientifique les bonnes entrées.

4 PROGRAMMATION DES MISSIONS SPATIALES POUR LE CLIMAT

Des limites techniques et financières

Les mesures faites depuis l'espace présentent toutefois des limites : les ondes électromagnétiques ne pénètrent guère sous les surfaces des solides ou des liquides, les paramètres de la basse atmosphère sont difficilement accessibles et beaucoup de mesures passives nécessitent un ciel clair. De plus, agressés par l'environnement spatial, les instruments se dégradent et leur étalonnage est difficile et instable. Il doit donc être régulièrement effectué.

L'instrumentation spatiale nécessite de nombreuses compétences : optique, mécanique et thermique pour les télescopes ; électronique, optoélectronique pour les plans focaux et numérique pour les traitements. Celle développée pour la recherche climatique, en particulier la mesure du carbone et du méthane, est relativement récente ; elle n'a été encouragée par les agences spatiales qu'au début du XXI^e siècle. De plus, en réponse aux besoins des scientifiques, le niveau toujours plus grand de résolution, précision et couverture demandé aux instruments les rend de plus en plus complexes et de réalisation délicate. Bien souvent le signal utile est très faible au milieu d'un « bruit ambiant » très fort. Seuls quelques industriels maîtrisent ces technologies. Une nouvelle génération d'outils n'apparaît habituellement que tous les dix ans et leur réalisation exige cinq années supplémentaires, ce qui représente un coût considérable. Ces technologies de pointe n'ont pas encore bénéficié d'un cycle industriel, à l'instar des satellites de télécommunication, capable d'induire un effet de série permettant de réduire les coûts. Les instruments restent donc de production artisanale.

Des programmes ambitieux

L'ambition aujourd'hui est de parvenir à mesurer depuis l'espace les gaz à effet de serre, tels que le CO₂ et le CH₄, afin de réaliser un inventaire des émissions et des absorptions, d'observer leur évolution, de surveiller et peut-être prédire le comportement du cycle global, et dans l'idéal de distinguer les émissions produites par l'activité humaine du cycle naturel. Ce dernier constituant une sorte de bruit de fond dans lequel il faut reconnaître la part due aux activités humaines.

De nombreux programmes sont actuellement lancés par les agences spatiales européenne, américaine, japonaise, indienne et chinoise (ESA, NASA, JAXA, ISRO et CAST), le centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique (DLR), le Centre national d'études spatiales français (CNES), ainsi que par des organisations représentant les utilisateurs comme EUMETSAT, l'organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques, ou le projet international GPM (Global Precipitation Monitoring) (Figures 24 à 29).

L'Agence spatiale européenne

L'Agence spatiale européenne, qui regroupe 22 pays, gère trois catégories de programmes d'observation de la Terre :

- 1) Le programme « **Earth Explorer** » de satellites à vocation de recherche scientifique et d'expérimentation de nouvelles techniques d'observation. Ce programme qui correspond bien à la vocation d'une agence spatiale est un grand succès car, outre sa contribution à la compréhension du fonctionnement du système Terre et aux effets des activités humaines, il permet le défrichage de nouvelles techniques de mesures et la mise au point des instruments correspondants, certains d'entre eux pouvant avoir vocation à devenir opérationnels. Parmi les satellites en vol ou en préparation qui contribuent déjà à la compréhension de l'évolution du climat, il convient ici de citer :
 - le satellite Cryosat qui mesure par altimétrie radar interférométrique l'épaisseur des glaces polaires ;
 - le satellite SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity), lancé en 2009, qui mesure par une technique de radiométrie interférométrique passive le contenu en eau superficielle des sols et, sur les océans, la salinité de la couche superficielle ;
 - Aeolus, satellite lancé en août 2018 qui est affecté à la mesure des vents dans la haute troposphère et la stratosphère par une technique de sondage par lidar embarqué.

Pour les années à venir, il y a plusieurs missions en préparation :

- tout d'abord la mission EarthCARE, réalisée en coopération avec le Japon, qui se focalisera sur le rôle des nuages et des aérosols dans le bilan radiatif de la Terre. La mission EarthCARE, dont le lancement est prévu en 2022, repose sur l'emploi de technologies lidar et radar très avancées qui n'ont jamais été utilisées dans l'espace jusqu'à présent ;

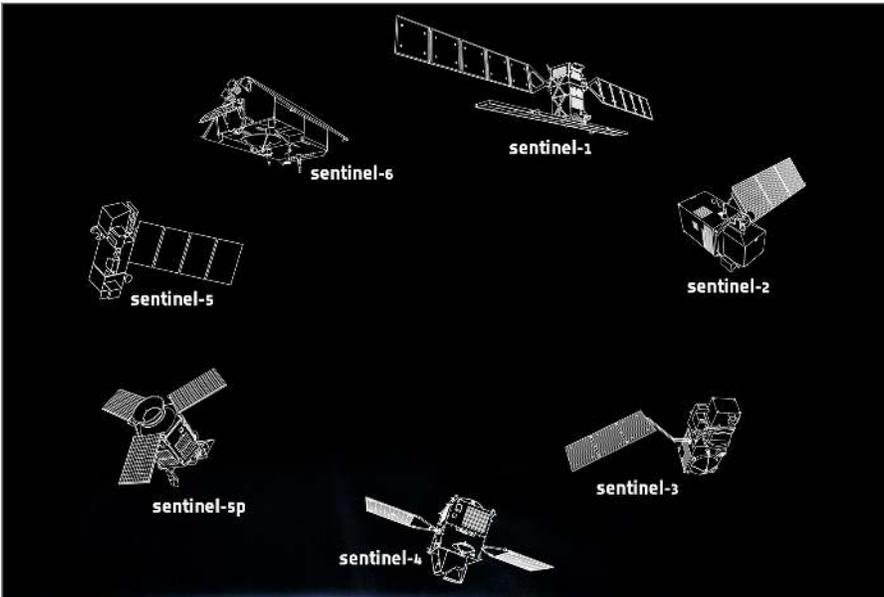


Figure 25 : Illustration graphique de la famille des satellites Sentinel.

- Les satellites Sentinel-2 sont des satellites porteurs d'imageurs optiques produisant des images multispectrales des terres émergées qui se situent dans la continuité des satellites américains Landsat. Sentinel-2A a été lancé le 23 juin 2015 et Sentinel-2B le 7 mars 2017. Ils fournissent une observation continue de la végétation, des ressources en eau, des zones côtières, des feux de forêts, des « alga blooms », de la sédimentation des estuaires, etc.
- Les satellites Sentinel-3 sont focalisés sur l'observation des océans. Ils emportent à la fois un altimètre océanique, le « Synthetic Aperture Radar Altimeter » (SRAL), un radiomètre micro-ondes pour le sondage vertical de la vapeur d'eau, un imageur optique multispectral à grand champ, OLCI (Ocean and Land Colour Imager) et le radiomètre imageur « Sea and Land Surface Temperature Radiometer » (SLSTR). Sentinel-3A a été lancé le 18 février 2016 et Sentinel-3B le 25 avril 2018. Le lancement de Sentinel-3C est prévu en 2021 et celui de Sentinel-3D plus tard au cours de la décennie. Ces satellites sont mis en œuvre par l'organisation européenne EUMETSAT.
- Sentinel-4 n'est pas un satellite autonome mais une charge utile réservée au sondage de l'atmosphère qui sera embarqué sur les satellites Météosat de troisième génération (Meteosat Third Generation, MTG) destinés au sondage atmosphérique (MTG-S) placés en orbite géostationnaire d'EUMETSAT. La charge utile Sentinel-4 comprend le spectromètre ultraviolet, visible et proche infra-rouge UVN (Ultraviolet Visible Near-infrared) et le sondeur en infra-rouge thermique IRS (InfraRed Sounder), qui seront embarqués sur le satellite MTG-Sounder (MTG-S).

- Sentinel 5-Precurseur a été lancé le 13 octobre 2017 (Sentinel 5 n'étant pas prévu avant 2021). Sentinel 5 P embarque l'instrument TROPOMI, un spectromètre développé par les Pays-Bas et mesurant les gaz et aérosols dans l'atmosphère (concentration de certains gaz comme l'oxyde de brome, le monoxyde de carbone, le dioxyde de chlore, le méthane, le formaldéhyde, l'oxygène). TROPOMI est un « gap filler » entre SCIAMACHY sur Envisat, OMI sur Eos/Aura et Sentinel 5 sur MetOp Second generation.
- Sentinel-5 est un instrument affecté à la mesure de l'ozone atmosphérique et d'autres composants mineurs de l'atmosphère depuis une orbite basse. Les instruments sont le spectromètre UVNS (Ultraviolet Visible Near-infrared Shortwave) et la suite du programme IASI (IASI-New Generation) qui sera embarqué sur les satellites MetOp de deuxième génération (MetOp Second Generation, MSG), opérés par EUMETSAT.
- Les satellites Sentinel-6 sont des satellites d'altimétrie océanique de très haute précision qui prennent la suite de la série des satellites franco-américains Jason 1, 2 et 3 et (pour la partie altimétrie océanique) des satellites de l'ESA ERS-1 et 2 et Envisat. Ils emportent un altimètre radar et un système de positionnement ultraprécis qui permettent la mesure de la topographie océanique à l'échelle globale et contribuent ainsi directement à la surveillance de l'élévation du niveau des mers due au réchauffement climatique, et aux applications océanographiques opérationnelles. Ce programme est réalisé en coopération entre l'ESA et EUMETSAT du côté européen et la NASA et la NOAA du côté américain. Le premier satellite Sentinel-6 doit être lancé par la NASA en novembre 2020.

Pour l'avenir des satellites Copernicus, plusieurs missions sont à l'étude qui pourraient être financées par l'ESA à la suite du Conseil ministériel à Séville fin novembre 2019 et par l'Union européenne dans son budget « Espace » au cours de la période 2021-2027. Parmi ces missions, il faut retenir ici en particulier la mission « Copernicus Anthropogenic Carbon Dioxide Monitoring » (CO2M) qui sera consacrée à la mesure du CO₂ atmosphérique. Chacun des trois satellites identiques emporterait un spectromètre proche infra-rouge et lointain avec une fauchée de 300 km pour observer et mesurer les concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et notamment pour cartographier sur des zones suffisamment larges (grâce à la fauchée) les concentrations de CO₂ au voisinage des sources d'émissions résultant de l'activité humaine. La charge utile permettrait aussi de mesurer les concentrations en NO₂ et d'observer les nuages et les aérosols pour améliorer la capacité à distinguer le CO₂ d'origine anthropique du « CO₂ naturel »¹.

1 Le Conseil ministériel de l'ESA qui s'est tenu à Séville les 27 et 28 novembre 2019 a décidé le financement de six missions d'observation de la Terre : outre la mission CO2M décrite ci-dessus, les missions suivantes ont été décidées : CHIME (Copernicus Hyperspectral Imaging mission), CIMR (Copernicus Imaging Microwave Radiometer) pour la surveillance de l'Arctique-glaces de mer, salinité et température de surface des océans par tous temps, CRISTAL (Copernicus Polar Ice and Snow Topography Altimeter), Cryosat Follow-on, LSTM (Copernicus Land Surface Temperature Monitoring), ROSE-L (L-band Synthetic Aperture Radar), complémentaire du radar du satellite Sentinel 1 en bande C.

- 3) La **troisième catégorie de programmes** que gère l'ESA concerne le développement des premiers de série des satellites météorologiques opérationnels d'EUMETSAT, les satellites Météosat en orbite géostationnaire et les satellites MetOp en orbite basse. Il convient donc de se reporter ci-dessous au chapitre traitant des satellites d'EUMETSAT.

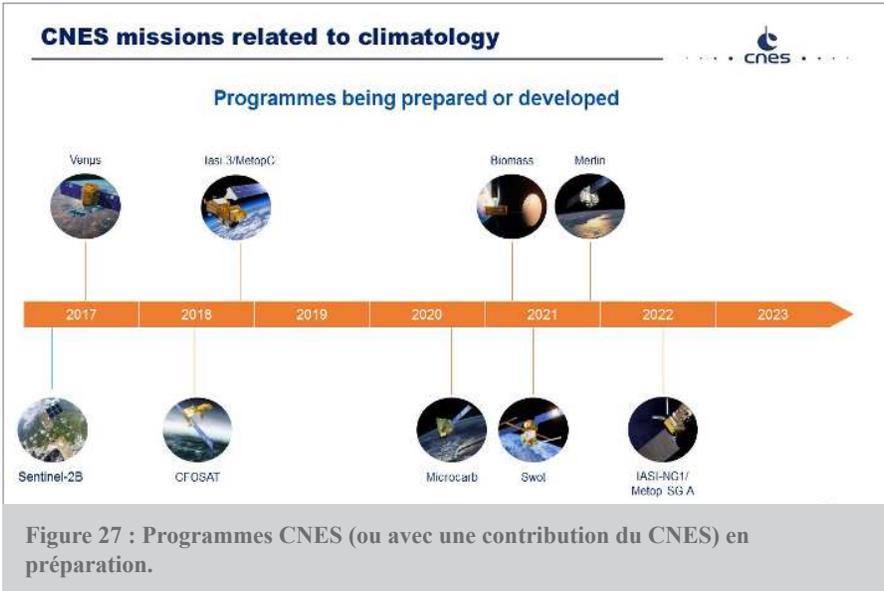
CNES

Le Centre national d'études spatiales (CNES) contribue activement et depuis de nombreuses années aux systèmes spatiaux d'étude du climat (Figures 26 et 27) soit à travers des missions spécifiques telles que les satellites Jason 1, 2 et 3 d'altimétrie océanique (en coopération franco-américaine) ou comme les missions Calipso (Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations, coopération franco-américaine) lancée en 2006 et Megha-Tropiques lancée en 2011 (coopération franco-indienne), soit encore par la fourniture d'instruments d'observation très avancés qu'il a développés comme l'instrument IASI qui équipe les satellites MetOp d'EUMETSAT.

Cette dernière contribution va d'ailleurs se poursuivre avec IASI NG (IASI Nouvelle Génération) pour les satellites MetOp Second Generation (MSG). Le CNES prépare aussi de nouvelles missions qui intéressent directement l'étude du cycle des gaz à effet de serre comme MicroCarb pour le suivi du dioxyde de carbone, prévu en 2021. Il emportera un spectromètre dispersif à réseau, qui sera capable de mesurer la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone sur l'ensemble du globe avec une grande précision (de l'ordre de 1 ppm) et sur un pixel de base rectangulaire de 4,5 km par 9 km. La mission Merlin (Methane Remote Sensing Lidar Mission) pour l'observation globale du méthane, réalisée en coopération avec le DLR allemand, emportera en 2024 l'instrument LIDAR Methane Integrated Path Differential Absorption (IPDA) développé par le DLR.



Figure 26 : Programmes CNES (ou comportant une contribution du CNES) en exploitation.



Dans le domaine de l'océanographie et de l'hydrologie continentale, le CNES est partenaire du satellite CFOSAT (China-France Oceanography SATellite) réalisé en coopération avec la Chine qui a été lancé en 2018. Sa charge utile comprend deux instruments, un radar en bande Ku SWIM (Surface Waves Investigation and Monitoring), fourni par la France et un diffusiomètre en bande Ku SCAT (wind Scatterometer), sous responsabilité chinoise. L'instrument SWIM mesure les propriétés des vagues (direction, longueur d'ondes, etc.) tandis que SCAT mesure l'intensité des vents et leur direction.

Le CNES prépare en outre la mission SWOT (Surface Water and Ocean Topography) en coopération avec la NASA, suite de sa longue et très fructueuse coopération autour de la mission Topex-Poseidon (1992) et des satellites Jason-1 à 3. Le satellite SWOT, qui doit être lancé en avril 2021, emportera un ensemble altimètre radiomètre (NADIR) du même niveau de performance que ceux des satellites Jason. Il emportera aussi un radar interférométrique en bande Ka à large fauchée dénommé KaRIn qui permettra de réaliser des mesures proches du nadir avec une fauchée large de 120 km alors que les radars altimétriques actuels sont limités à une bande de quelques kilomètres à la verticale du satellite. Cette large trace au sol permettra d'accéder au champ spatialisé des niveaux d'eau des fleuves de largeur supérieure à 100 m, ainsi que des lacs et zones d'inondation de surface supérieure à 250 m x 250 m, avec une précision décimétrique, et de quantifier les pentes avec une précision de l'ordre 1.7 cm/km (après moyennage sur une surface en eau > 1 km²). Couplées à des modèles de géoïde de précision et à des modèles numériques de terrain précis, les données de la mission SWOT amélioreront de manière radicale des modèles hydrodynamiques fluviaux menant à des estimations des débits. Elles permettront également de déterminer les variations temporelles de stock d'eau dans les hydrosystèmes de surface (lacs, réservoirs et zones humides) et les dynamiques d'écoulements. Pour ordre de grandeur, on estime à plus de

30 millions de lacs dans le monde qui ont une superficie supérieure à 1 ha. Outre les hydrologues, SWOT est attendue avec impatience par les océanographes. KaRIn permettra en effet d'observer les circulations de type sub-méso et méso-échelle (de quelques centaines à quelques dizaines de kilomètres) comme les tourbillons ou les filaments, d'en caractériser le transport vertical très dynamique, d'étudier la circulation côtière, d'affiner les modèles de prévision océanographiques mais aussi climatiques actuels. Le tout avec une précision centimétrique.

EUMETSAT

Les satellites d'EUMETSAT (Figure 28) sont essentiellement consacrés à la prévision météorologique à court et moyen terme mais plusieurs de leurs instruments fournissent des données qui s'avèrent précieuses pour l'étude du climat et plus particulièrement pour comprendre le rôle de l'atmosphère dans la régulation des gaz à effet de serre.

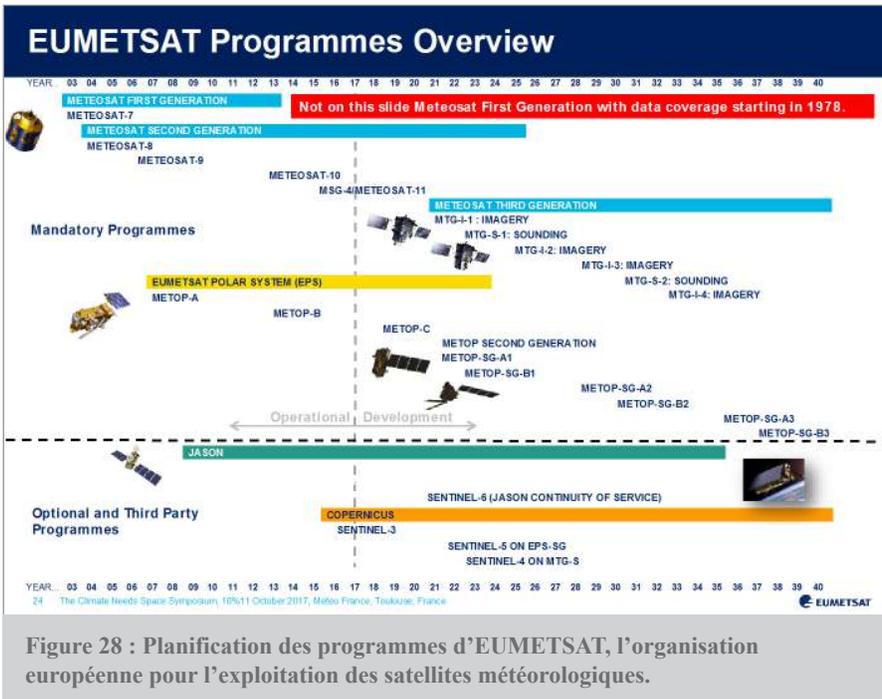


Figure 28 : Planification des programmes d'EUMETSAT, l'organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques.

Ils comprennent la famille des satellites Météosat en orbite géostationnaire dont la deuxième génération est en exploitation et seront remplacés au cours de la décennie à venir par les satellites de troisième génération MTG (Meteosat Third Generation), déployés à partir de 2021. Les MTG fourniront un service d'imagerie plus avancé et un nouveau service de sondage dans l'épaisseur de l'atmosphère très avancé dans l'infrarouge et dans l'ultraviolet. Six satellites MTG sont prévus, dont quatre remplissant la mission d'imagerie (MTG-I) et deux la mission de sondage (MTG-S). La configuration opérationnelle des MTG comprendra deux satellites de type MTG-I opérant en tandem,

l'un balayant l'Europe et l'Afrique toutes les 10 minutes et l'autre l'Europe seulement toutes les 2,5 minutes, et un satellite MTG-S.

La deuxième famille de satellites exploités par EUMESAT est celle des satellites MetOp placés en orbite basse dont la première génération est en exploitation depuis 2006. Là aussi, EUMETSAT prépare la génération suivante appelée MSG (MetOp Second Generation) qui comprendra deux types de satellites, MetOp-SG A et MetOp-SG B :

- Les satellites MetOp-SG A seront consacrés à la mission d'imagerie et de sondage avec un ensemble d'instruments infra-rouge, micro-onde et d'imagerie pour effectuer des profils de température, d'humidité et de constituants mineurs dans l'atmosphère : IASI-NG (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer - Next Generation), MWS (Microwave Sounder), METImage (radiomètre imageur multi-spectral) dans le visible et l'infra-rouge, qui prendra la suite des instruments AVHRR américains), 3MI (Multi-viewing, Multi-channel, Multi-polarisation Imager), et enfin le spectromètre UVNS Sentinel 5 décrit plus haut.
- Les satellites MetOp-SG B seront consacrés à la mission d'imagerie en micro-onde qui observera par radar le vent à la surface de la mer et l'humidité des sols ainsi que les précipitations et les nuages de glace grâce à ses trois instruments embarqués : SCA (Scatterometer), MWI (Microwave Imager) et ICI (Ice Cloud Imager).

Les deux types de satellites seront équipés d'instruments de radio-occultation (RO) du signal reçu des satellites de navigation (Global Navigation Satellite System - GNSS) pour la mesure au limbe de sondages de température et d'humidité avec une haute résolution verticale.

Les six satellites MetOp-SG (trois de type A et trois de type B) devraient être mis en orbite à partir de fin 2022 et être exploités jusqu'en 2043.

NASA/NOAA

La Figure 29 présente l'ensemble des satellites contribuant à la mesure des précipitations dans l'atmosphère terrestre et met en évidence le rôle de la NASA et de la NOAA dans cette constellation. Toutefois, la NASA contribue aussi de manière active à l'étude des gaz à effet de serre bien que ses ambitions dans ce domaine aient été fortement réduites du fait des orientations politiques de l'administration fédérale actuelle, très réticente vis-à-vis des programmes de recherche consacrés à l'étude du réchauffement climatique. Elle a cependant de très gros succès à son actif, en particulier le fameux « A-Train » formé par les satellites Aqua lancé en 2002, Aura, lancé en 2004, Calipso (en coopération avec la France), lancé en 2006, GCOM-W et GPM Core (en coopération avec la JAXA), lancés en 2012 et 2014 respectivement, Cloudsat (en coopération avec le Canada), lancé en 2016, OCO-2 (Orbital Carbon Observatory), lancé en 2014 après la perte lors du lancement du premier OCO en 2009. Il faut y ajouter les satellites qui ne font pas partie du A-Train : SMAP (Soil Moisture Active Passive), lancé en 2015 et Icesat-2 lancé en 2018. Un instrument OCO-3 vole à bord de la Station spatiale internationale.

Pour l'avenir, plusieurs missions sont en préparation dont GeoCarb, instrument qui sera embarqué sur une plate-forme géostationnaire, prévu en 2022, et SWOT que nous avons déjà évoqué.

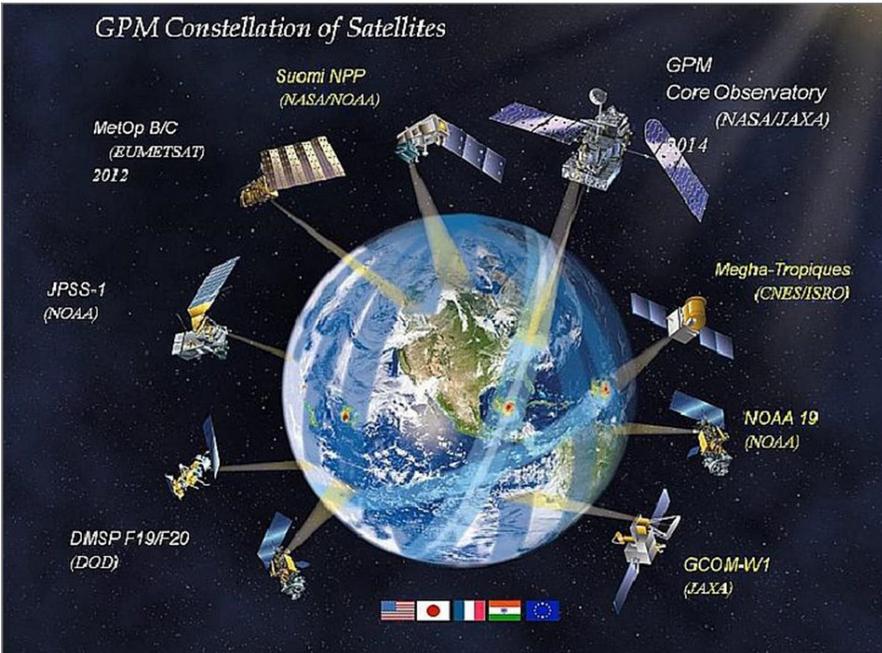


Figure 29 : La constellation de satellites GPM (Global Precipitation Measurement) coordonnée par cinq agences spatiales : la NASA (États-Unis), la JAXA (Japon), le CNES (France), l'ISRO (Inde) et EUMETSAT.

JAXA

Le Japon est lui aussi très actif et conduit via la JAXA des missions spatiales consacrées à l'étude du climat. Les missions de mesure du dioxyde de carbone atmosphérique se sont succédé : GOSAT (Mesure de la distribution du dioxyde de carbone) lancé en 2009 et rebaptisée « Ibuki », suivie de GOSAT- 2 lancé en 2018 (Ibuki-2) et bientôt GOSAT-3, prévu en 2022. Il faut y ajouter les deux missions GCOM-W (Shizuku) et GPM-Core en coopération avec la NASA qui ont déjà été évoquées et la mission GCOM-C (Shikisai) pour la mesure du cycle du carbone et de l'énergie, qui a été lancée en 2017. Le Japon contribue aussi à la mission EarthCARE de l'ESA dont le lancement est prévu en 2021.

Programmes d'observation de la Terre de la Chine

La Chine a mis en place un système global d'observation de la Terre par satellites pour l'observation à l'échelle globale et locale de l'atmosphère, des océans et des terres émergées. Ces satellites permettent, en mission principale ou secondaire, de recueillir des informations sur les causes et les conséquences des changements climatiques telles que l'utilisation des sols, les paramètres de la végétation, les ressources en eau et les paramètres liés à l'eau, le contenu et les paramètres de l'atmosphère, etc.

- Les satellites Feng Yun de météorologie en orbites polaires héliosynchrones à 836 km d'altitude sont dotés, pour la génération la plus récente, d'un spectro-imageur à

moyenne résolution, d'un sondeur atmosphérique hyperspectral Infra-Rouge, de sondeurs micro-ondes (température et humidité), d'un imageur micro-ondes, d'un spectromètre hyperspectral d'absorption pour l'observation des gaz à effet de serre, etc.

- Les satellites Fen Yun de météorologie en orbite géostationnaire sont équipés d'un imageur multispectral visible et Infra-Rouge de résolution 0,5 à 4 km, de sondeurs de température et humidité.
- Les satellites Hai Yang de surveillance des océans de dernière génération sont équipés d'un imageur pour les zones côtières, d'un radiomètre optique de mesure de couleur et de température des océans, d'un radiomètre imageur micro-ondes, d'un radar altimètre et diffusiomètre.
- D'autres satellites fournissent des données utilisables pour les recherches sur le climat et le suivi de son évolution. Ce sont notamment : les satellites Zi Yuan (Resource) et Tian Hui (Topographic Mapping) d'observation des ressources (caméra multispectrale), ainsi que les satellites Gao Fen optique ou radar à haute ou très haute résolution.
- Dans le domaine des satellites destinés spécifiquement aux études sur le climat, la coopération avec le CNES pour le satellite CFOSAT (China-France Oceanography SATellite) a été mentionnée plus haut. La coopération avec le CNES devrait se poursuivre avec les accords signés à fin 2019 pour le développement d'un satellite de recherche sur le cycle de l'eau. Ce satellite pourrait inclure un radiomètre interférométrique en bande L de nouvelle génération pour l'observation de l'humidité des sols et de la salinité des océans, ainsi qu'un radiomètre interférométrique à haute résolution en bandes X et Ka pour mesurer l'équivalent en eau de la couverture de neige et pour observer l'état de gel/dégel de la surface au sol.
- Le minisatellite TanSat, financé en Chine par le Ministère de la Science et de la Technologie et lancé en décembre 2016, est affecté à la détection et au suivi du dioxyde de carbone à l'échelle globale. L'objectif scientifique est d'améliorer la compréhension de la distribution du CO₂ et de ses variations saisonnières. Les tests de calibration ont été achevés à l'été 2017. La validation des algorithmes d'extraction de données a été faite sur la base de simulations et de mesures au sol. Les cartes de concentration de CO₂ produites depuis mi 2017 mettent en évidence les variations saisonnières entre les deux hémisphères. Elles mettent aussi en évidence les zones de forte émission de CO₂ liées à l'activité humaine.

La précision des estimations de concentration en CO₂ est toutefois limitée par la faible taux de couverture des mesures effectuées par le satellite à chaque orbite (en lien avec la fauchée de l'instrument). La combinaison des mesures faites par OCO-2 (US) et TanSat est possible mais introduit des incertitudes liées à celles des calibrations faites sur chaque satellite.

5 CONSTAT ET RECOMMANDATIONS

De nombreuses missions spatiales sont actuellement dédiées à l'environnement et au climat, soit spécifiquement soit en liaison avec la météorologie et l'étude de l'atmosphère dans toute son étendue. Elles permettent à la communauté des experts d'apprécier le contenu gazeux de l'atmosphère et d'évaluer périodiquement, à certaines échelles disponibles, les concentrations moléculaires globales influant sur le climat ainsi que leurs variations saisonnières et régionales de grande échelle.

Les progrès accomplis par les instruments embarqués, notamment les spectromètres et les interféromètres à haute résolution spectrale, sont très significatifs à cet égard. Les difficultés d'interprétation ont été soulignées et des efforts demeurent quant aux données issues des divers modèles de traitement ainsi que des biais de mesure qui doivent être minimisés.

Dans son article 13 alinéa 7, le traité établi par les Accords de Paris en 2015 a souhaité que soit dressé par chacune des Parties « un rapport national d'inventaire des émissions (ou sources) et des absorptions (ou puits) anthropiques de gaz à effet de serre », afin d'alimenter le Comité des experts chargés d'établir l'évolution climatique et de vérifier les effets des mesures prises pour en atténuer le cours.

La difficulté technique de séparer la part anthropique de la part naturelle des concentrations de ces gaz, aussi bien à l'émission qu'à l'absorption, a été soulignée auparavant. La sincérité des estimations d'inventaire effectuées par les diverses autorités engagées par le traité est une difficulté d'un autre ordre mais entraîne une incertitude supplémentaire pour discriminer la part anthropique du signal global.

L'observation depuis l'espace est bien capable de mesurer la concentration de dioxyde de carbone et de méthane sur toute la colonne atmosphérique, aux précisions respectives indiquées de l'ordre de 1 à 2 ppm et 5 à 10 ppb, mais la partie de cette concentration relative à la très basse atmosphère, là où se produisent effectivement les sources et

les puits d'origine anthropique, demeure plus imprécise en vue d'une comparaison avec des mesures objectives effectuées in situ ou en basse altitude de proximité. À l'heure actuelle aucune mesure spatiale de CO₂ n'est suffisamment précise et résolue pour répondre aux demandes formulées dans les Accords de Paris pour surveiller et contrôler les émissions produites par l'activité humaine.

L'apport du secteur spatial s'inscrit dans un réseau d'observation complet même s'il permet déjà, à l'échelle de régions ou de zones urbaines de grande envergure, d'apprécier des variations d'intensité par rapport aux valeurs moyennes de concentration relevées par les observatoires de référence. Le lien de transport via la dynamique météorologique s'y ajoute. Dans cet apport il ne faut pas négliger la capacité de mesurer les traces de nombreuses autres composantes gazeuses issues d'une origine anthropique très souvent en lien avec la production de dioxyde de carbone. L'intérêt de cette corrélation n'est pas négligeable pour le recensement des sources et doit éveiller l'attention sur la validité des inventaires dits nationaux.

Il demeure que la demande émanant des Accords de Paris représente un défi ardu et doit mobiliser aussi bien la communauté scientifique que l'industrie afin d'élaborer un système dans lequel les mesures s'appuieront sur les différents types de capteurs et vecteurs, spatiaux, aériens, terrestres et de surface océanique. Les mesures effectuées par tous ces capteurs seront rapprochées par de meilleures modélisations et une bonne inter calibration, et le perfectionnement des modèles physiques d'assimilation permettra l'utilisation de toutes les données.

D'évidence « le climat a besoin d'espace » pour comprendre davantage, surveiller et prévoir l'état de la Planète dans le changement en cours et dans l'urgence qu'il impose chaque année plus encore.

Au terme de cet examen plusieurs recommandations peuvent être exprimées.

► **Recommandation n°1 :**

Mettre en priorité dans la programmation des agences spatiales et des organismes associés le développement d'instruments susceptibles d'améliorer l'acuité des données, la couverture spatiale et la périodicité, tous facteurs permettant de perfectionner les modélisations et prévisions du changement climatique. La recherche de techniques et procédés innovants doit être soutenue quand elle permet d'atteindre un meilleur pouvoir résolvant sur les paramètres physiques visés ou quand elle permet d'intensifier et de garantir la continuité des observations. La continuité des observations est indispensable pour les prévisions faites aujourd'hui comme pour les analyses et réanalyses du passé qui seront faites demain afin de mesurer l'impact des actions prises en vue de réduire les gaz à effet de serre d'origine anthropique.

► Recommandation n°2 :

Organiser la mise à disposition des experts de la cartographie des sources et puits de CO₂ à la meilleure échelle possible à partir des données spatiales calibrées. La construction de cette banque de données partagée obligera la réduction des biais de mesure, la confrontation des modèles et permettra une meilleure évaluation des tendances.

► Recommandation n°3 :

Améliorer la coordination scientifique interdisciplinaire sur l'utilisation des données spatiales afin que les effets corrélés avec divers marqueurs (biophysiques et biologiques des milieux terrestres et marins) soient associés avec les concentrations de gaz à effet de serre et ainsi mieux pris en compte dans le modèle prévisionniste de long terme.

► Recommandation n°4 :

S'efforcer à l'aide de la communauté scientifique, assez bien coordonnée en soi, de formuler les étapes prioritaires en termes d'acquisition de données d'observation, à l'instar de ce que fait la communauté des astronomes, afin que les contributeurs des agences spatiales et ces agences elles-mêmes aboutissent à un plan stratégique cohérent avec ces priorités.

GLOSSAIRE

| | |
|------------|--|
| AAE : | Académie de l'air et de l'espace |
| AMSU : | <i>Advanced Microwave Sounding Unit</i> |
| CCI : | <i>Climate Change Initiative (ESA)</i> |
| CEA : | Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives |
| CEOS : | <i>Committee on Earth Observation Satellites</i> (Comité sur les satellites d'observation de la Terre) |
| CMA : | <i>Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement</i> |
| CNES : | Centre national d'études spatiales |
| CNRM : | Centre national de recherches météorologiques, Météo-France |
| CNRS : | Centre national de la recherche scientifique |
| DLR : | <i>Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt</i> (Centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique) |
| ECMWF : | <i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i> (Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme) |
| ESA : | <i>European Space Agency</i> (Agence spatiale européenne) |
| EU : | <i>European Union</i> |
| EUMETSAT : | <i>European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites</i> (Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques) |
| GCOS : | <i>Global Climate Observing System</i> (en français SMOC) |
| GIEC : | Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (en anglais IPCC) |
| IASI : | <i>Infrared Atmospheric Sounding Interferometer</i> (Interféromètre atmosphérique de sondage infrarouge) |
| ICOS : | <i>Integrated Carbon Observation System</i> |
| IPCC : | <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (en français GIEC) |
| JAXA : | <i>Japan Aerospace Exploration Agency</i> |
| JPL : | <i>Jet Propulsion Laboratory</i> (NASA) |
| JRC : | <i>EU Joint Research Centre</i> (Centre commun de recherche de l'UE) |

| | |
|----------|--|
| LATMOS : | Laboratoire Atmosphères, milieux, observations spatiales (unité mixte de recherche relevant du CNRS, de l'université de Versailles Saint-Quentin (UVSQ) et de l'université Pierre et Marie Curie (UPMC) à Paris) |
| LEO : | <i>Low Earth Orbit</i> (orbite terrestre basse) |
| LIDAR : | <i>Laser detection and ranging</i> (télédétection par laser) |
| LSCE : | Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (unité mixte de recherche entre le CEA, le CNRS et l'Université de Versailles Saint-Quentin) |
| MFF : | <i>Multiannual Financial Framework (European Union)</i> |
| MWS : | <i>Microwave Sounder</i> |
| NASA : | <i>National Aeronautics and Space Administration (USA)</i> |
| NOAA : | <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> (agence américaine d'observation océanique et atmosphérique) |
| SMOC : | Système mondial d'observation du climat (en anglais GCOS) |
| UE : | Union européenne |
| UNFCCC : | <i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> |
| WCC : | <i>World Climate Conferences (WMO)</i> |
| WMO : | <i>World Meteorological Organization</i> |

PARTICIPATION

Les membres suivants ont participé à la rédaction de ce document.

- Marc Pircher (président du comité de programme du colloque)
- Gérard Brachet
- Jean Broquet
- Cathy Clerbaux
- Alain Hauchecorne

Programme du colloque « Le Climat a besoin d'Espace », 10-11 oct 2017
Programme of conference "The Climate needs Space", 10-11 Oct 2017

Mardi 10 octobre / Tuesday 10 October

08:30 Enregistrement, café d'accueil / Registration, coffee

09:30 Discours de bienvenue / Welcome speeches

- Anne-Marie Mainguy, présidente de l'Académie de l'air et de l'espace / president of Air and Space Academy
- Marc Pontaud, directeur de la recherche / director of research, Météo-France
- Jean-Claude Dardelet, vice-président / vice president, Toulouse Métropole

10:00 Session 1 - Défis scientifiques / Scientific challenges

President: C. Clerbaux (LATMOS-IPSL, AAE)

Introductions et vue d'ensemble / Introductions and overview

Vers une capacité opérationnelle à contrôler les émissions de CO2 provenant des combustibles fossiles

Towards an operational capacity to monitor fossil fuel CO2 emissions

B. Pinty (Copernicus, European Commission)

Mesures spatiales dans un cadre de changement climatique mondial / Space measurements in the context of global climate change

R. Sférian (Météo-France, CNRM)

Questions-réponses / Questions & answers

11:00 Pause café / Coffee break

Intervenants / Speakers

Surveillance du CO2 et du CH4 depuis l'espace : défis, réalisations, promesses

CO2 and CH4 monitoring from space : challenges, realisations, promises

P. Bousquet (LSCE)

Les évaluations empiriques spatio-temporelles de flux de CO2 à partir d'observations de la surface et de l'atmosphère / Empirical spatio-temporal estimates of CO2 fluxes from surface and atmospheric observations,

C. Crevoisier (LMD/CNRS)

L'Arctique : une concentration d'émissions de gaz à effet de serre

The Arctic: a greenhouse gas emission hotspot

M. Heimann (MPI-BGC)

Questions-réponses / Questions & answers

13:00 Pause déjeuner / Lunch break

14:30 Session 2 - Mesures atmosphériques nécessaires depuis l'espace / Needed atmospheric measurements from Space

President: G. Ehret (DLR)

Introduction

S. Briggs (Chairman of GCOS)

Intervenants / Speakers

Prise en compte des observations des nuages et de la vapeur d'eau dans la sensibilité du climat et de la circulation atmosphérique / Water vapor and cloud observations needed to solve climate sensitivity and circulation puzzles

S. Bony (LMD)

Exigences relatives à la surveillance du CO2 depuis l'espace : Est-il réaliste de viser le contrôle d'émissions anthropogéniques ? / Requirements for the monitoring of CO2 from space: Is it realistic to aim at the monitoring of anthropogenic emissions?

F-M. Bréon (LSCE-CEA)

L'observation du vent à une échelle globale : comment, et quel bénéfice pour la prévision du temps et du climat ? / Observation of the wind at global scale: how, and what benefit for weather and climate forecasting

A. Dabas (Météo-France, CNRM)

Exigences relatives à la surveillance du CH4 depuis l'espace : de quoi aurions-nous besoin pour séparer les processus ? / Requirements for monitoring CH4 from space: what would we need to separate processes?

J. Marshall (MPI-BGC)

De la contribution de la mesure des aérosols depuis l'espace à l'étude des interactions aérosols-climat

Contribution of aerosol measurements from space to the study of climate-aerosol interactions

P. Nabat (Météo-France, CNRM)

Questions-réponses / Questions & answers

17:30 Cocktail

Mercredi 11 octobre / Wednesday 11 October

09:00 Session 3 : Les instruments spatiaux pour le climat : une vision technique / Space instruments for climate: a technical overview

President: E. Boussarie (CNES)

Point hors Europe / Overview outside of Europe

D. Crisp (NASA-JPL)

Intervenants des industries et agences / Speakers from industries and agencies
La mesure du méthane avec le Lidar de Merlin / Methane measurement with Merlin Lidar instrument

M. Alpers (DLR)

Airbus DS : Les instruments spatiaux pour le climat ; une vue d'ensemble / Airbus DS Space instruments for climate: an overview

D. Gillieron (Airbus)

Thales Alenia Space : Les instruments spatiaux pour le climat / Thales Alenia Space: Space instruments for climate,

Y. Baillion (TAS)

10:30 Pause café / Coffee break
Les différentes façons de mesurer les paramètres atmosphériques / Different ways to measure atmospheric parameters

B. Cugny (CNES)

Les instruments de l'ESA / ESA instruments

R. Meynard (ESTEC)

Les instruments Eumetsat pour les relevés de données climatiques / Eumetsat instruments for climate data records

J. Schulz (Eumestat)

Questions-réponses / Questions & answers
12:30 Pause déjeuner / Lunch break

14:00 Table ronde / Round table

President: P. Lecomte (ESA)

Participants :
Présidents des sessions / presidents of sessions:

Cathy Clerbaux, directrice de recherche CNRS au Laboratoire Atmosphères, milieux, observations spatiales (LATMOS-IPSL), AAE

Éric Boussarie, sous-directeur Systèmes instrumentaux au CNES

Gerhard Ehret, head of Lidar department, Institute of Atmospheric Physics, DLR

Des décideurs d'agences et d'industries / Agency and industry leaders:

Nicolas Chamussy, executive vice president space systems, Airbus Defence and Space

Mark Doherty, senior advisor, ESA

Pr. Pascale Ehrenfreund, chair of the DLR Executive Board

Jean-Loïc Galle, président-directeur général de Thales Alenia Space

Jean-Yves Le Gall, président du Centre national d'études spatiales (CNES)

Dr Jörg Schulz, climate service product manager, Eumetsat

16:00 Conclusions

Nadia Pellefegue, vice-présidente du conseil régional Occitanie / vice-president of the Occitania regional council

Marc Pircher, président du comité de programme, correspondant AAE, ancien directeur du Centre spatial de Toulouse, CNES / programme committee chairman, AAE correspondent, former director of Toulouse space centre, CNES

16:45 Fin du colloque / End of conference

La COP 21 a été le point d'orgue d'une prise de conscience des États face au changement climatique et ses graves conséquences pour notre planète. Alertés depuis des années par la communauté scientifique, les gouvernants se sont enfin engagés à réduire les émissions anthropiques de gaz à effet de serre, pour tenter de limiter la hausse des températures moyennes du globe. Or, pour évaluer l'efficacité des stratégies mises en œuvre, il faut des mesures précises, ce qui représente un défi à la fois scientifique et technologique.

L'Académie de l'air et de l'espace a souhaité prendre part à ce débat en organisant un colloque international en octobre 2017 pour mieux examiner l'apport du spatial dans la surveillance des variables climatiques, en particulier les gaz à effet de serre, et faire dialoguer entre eux les scientifiques, les agences spatiales et les industriels. Ce dossier 47 présente une synthèse des discussions et élabore des recommandations à l'attention des décideurs.

COP21 was a crucial moment in terms of the growing awareness of states of the reality of climate change and its grave consequences for our planet. Alerted for years by the scientific community, governments at last committed to reducing anthropogenic greenhouse gas emissions in order to slow down and halt the rise in average global temperatures. However, precise measures are needed to assess the effectiveness of these strategies, and this represents a scientific and technological challenge.

The Air and Space Academy decided to take part in this debate by organising an international conference in October 2017. The aim was to examine the contribution of space systems in improving our understanding of phenomena influencing the climate and to bring together scientists, space agencies and industry to discuss the different issues. Dossier 47 presents a summary of findings along with key recommendations for stakeholders.

www.academieairespace.com



ISBN 978-2-913331-83-9

ISSN 1147-3657

15€