

## GROUPE DE TRAVAIL THEMATIQUE ATMOSPHERE

Philippe Chambon, Frédéric Chevallier, Cyril Crevoisier (Président sortant), Alain Dabas (Président entrant), Carole Deniel (thématicienne), Gaëlle Dufour, Jean-Louis Dufresne, Fabrice Jégou, Olivier Jourdan, Laurent Labonnote, Pierre Tabary (thématicien), Valérie Thouret, Nicolas Viltard.

### 1. Introduction

**Objectifs scientifiques.** La compréhension des phénomènes atmosphériques constitue un enjeu majeur pour la connaissance du Système Terre et pour répondre à des préoccupations fortes de nos sociétés. De nombreuses incertitudes demeurent quant au bilan des gaz à effet de serre, acteurs majeurs du réchauffement climatique, ou quant à certaines contraintes ou rétroactions présentes au sein du système climatique (rôle des nuages, des aérosols, de la vapeur d'eau et de leurs couplages). Les espèces chimiques réactives affectent de manière directe ou indirecte la qualité de l'air et le climat. L'adaptation au changement climatique passe par notre capacité à nous protéger des événements extrêmes et climatiques violents (tempêtes, pluies diluviennes, éruptions volcaniques). L'observation de la Terre depuis l'espace, du fait de sa couverture spatio-temporelle, constitue l'un des piliers fondamentaux pour progresser significativement dans le domaine en combinaison avec des données in situ et aéroportées et en association étroite avec la modélisation numérique du système Terre.

**Observables.** L'observation spatiale, complétée par les mesures réalisées par des ballons, des avions ou des stations au sol, permet d'accéder à un nombre de plus en plus grand de variables atmosphériques. Il est important de rappeler que l'étude des processus atmosphériques nécessite de croiser l'observation de plusieurs variables. Par exemple, la compréhension du couplage entre aérosols et nuages passe par la caractérisation de paramètres tant physiques (altitude, épaisseur optique) que microphysiques (émissivité, taille et forme des particules, etc.), pour lesquelles les niveaux de maturité sont différents. De plus, la mesure par télédétection de nombreuses variables atmosphériques au niveau de précision requis reste particulièrement difficile. Par exemple, le suivi des tendances, variabilités diurne, synoptique, saisonnière et interannuelle des gaz à effet de serre sont de deux ordres de grandeur inférieures aux valeurs de fond.

**Science de l'observation et moyens.** Interpréter les observations spatiales en paramètres géophysiques nécessite un travail amont en physique de la mesure, spectroscopie et transfert radiatif, étalonnage/validation, analyse de données, développement d'algorithmes, dans lequel la communauté nationale, soutenue par le CNES, est fortement impliquée. Seule la complémentarité des observations sol, aéroportées et spatiales permet de répondre aux objectifs scientifiques décrits ci-dessus, dans le cadre de campagnes dédiées ou en réseaux de mesure à long-terme. Les campagnes ballons permettent d'accéder à des couches atmosphériques (interface troposphère/stratosphère, couche limite) encore difficilement atteignables depuis l'espace. Les mesures aéroportées permettent l'étude de phénomènes particuliers et d'accéder à des régions spécifiques, tout en assurant une grande répétabilité spatiale et temporelle. Enfin, ces vecteurs aéroportés sont un élément indispensable de déploiement des démonstrateurs spatiaux et de validation des missions spatiales.

**Priorités du SPS de La Rochelle 2014 et du séminaire ballon 2015.** Les recherches soutenues ces dernières années suivent les priorités définies lors du séminaire de prospective scientifique de 2014, et lors du séminaire de prospective Ballons pour l'observation de la Terre de 2015. L'ensemble des missions prioritaires à court terme ont été engagées et sont en cours de développement (MicroCarb et Merlin pour l'observation des gaz à effet de serre anthropiques, Stratéole-2 pour l'étude de la haute troposphère-basse stratosphère). La plupart des missions à moyen et long termes ont été instruites et les recherches soutenues (développement des aéroclippers pour le suivi de l'intensité des cyclones, campagnes de ballons stratosphériques), même si le futur de certaines n'est toujours pas assuré (Mescal pour la mesure des aérosols et des nuages par mesure active) ou actuellement inexistant (ORPEO pour la mesure de la qualité de l'air à haute répétitivité, LiVE pour la mesure du profil vertical de la vapeur d'eau ou DYCECT pour le bilan d'énergie dans la convection). Enfin, une consultation large de la communauté en 2016 a fait ressortir la nécessité du renouvellement du Falcon20 de l'unité SAFIRE, toujours non réalisé.

## 2. Bilan et avancées depuis la prospective 2014

### 2.1. Les incertitudes majeures du changement climatique

#### 2.1.1. Gaz à effet de serre

**Objectifs scientifiques.** L'observation depuis l'espace des gaz à effet de serre « à longue durée de vie » comme le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) et le méthane (CH<sub>4</sub>), bien connus grâce aux réseaux de mesure au sol, vise à mieux caractériser leurs sources et puits à la surface du globe. La précision des inventaires d'émissions de GES d'origine anthropique est notamment jugée insuffisante pour la gestion politique des émissions, à l'échelle de la ville et à celle d'un pays ; leur amélioration par des mesures atmosphériques suscite un intérêt récent.

**Bilan.** Grâce au soutien du CNES et à la participation de plusieurs équipes au programme CCI-GHG de l'ESA, les contenus troposphériques de CH<sub>4</sub> retrouvés avec IASI sont désormais assimilés en quasi-temps réel au Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT) afin de réaliser les analyses des profils de concentration de ce gaz dans le cadre du service atmosphère de Copernicus. Forte de son expertise, de son implication dans les mesures au sol et de ses modèles physiques (rayonnement, chimie-transport) et statistiques, la communauté française est particulièrement active sur la préparation des futures missions MicroCarb/CNES, Merlin/CNES-DLR, IASI-NG/CNES-Eumetsat et GeoCarb/NASA. Au niveau européen, elle accompagne la Commission européenne et l'ESA dans la préparation de la future mission Sentinel-7/CO2M dédiée aux émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> pour la fin de la décennie 2020, après la non sélection en 2015 du projet Carbonsat soumis au programme EE8 de l'ESA. La communauté s'implique également de manière croissante sur la validation des produits spatiaux avec un bouquet innovant de mesures au sol, par ballon ou par avion (AirCore, Amulse, picoSDLA, EM27-Sun, etc.) qu'elle déploie dans le cadre du programme MAGIC de campagnes dédiées.

#### 2.1.2. Forçage climatique dû aux aérosols

**Objectifs.** La variabilité des aérosols atmosphériques est l'une des principales sources d'incertitudes sur l'évolution du climat. Les aérosols ont aussi une grande influence sur la qualité de l'air, la chimie atmosphérique ou le cycle de vie des nuages. Leur suivi global et régulier nécessite de maintenir une stratégie d'observation multi-senseurs combinant instruments spatiaux (passifs et actifs), sols et aéroportés.

**Bilan.** Des progrès significatifs ont été réalisés ces dernières années dans la compréhension du cycle des aérosols et de son couplage avec celui de l'eau grâce à la restitution à l'échelle planétaire des propriétés optiques et granulométriques des aérosols. Des climatologies des aérosols fins et grossiers ont pu être construites à partir des données POLDER grâce au développement de nouveaux algorithmiques tel GRASP. Les observations IASI ont également permis d'avoir accès à la distribution et à l'altitude des modes grossiers des aérosols désertiques et des premiers résultats sur les aérosols sulfatés et provenant des feux de biomasse. Ces travaux ont permis le suivi du transport des poussières désertiques et de leur dépôt au-dessus de l'Atlantique. Ils se prolongent dans le cadre de la préparation de l'instrument 3MI et de son démonstrateur aéroporté OSIRIS déployé notamment dans le cadre de la campagne aéroportée AEROCLO-SA et de l'instrument IASI-NG. Le lidar de la mission CALIPSO a permis des avancées significatives dans l'étude de la distribution verticale des aérosols et des nuages et de leur typologie. Un projet soutenu par le TOSCA (EECLAT) a permis de coordonner cette thématique au niveau national et de préparer les futures missions EarthCare et Mescal. La Cal/Val de toutes ces missions spatiales s'appuie régulièrement sur les réseaux sols (réseau de photomètres AERONET, réseau NDACC de détection du changement de la composition atmosphérique) et sur les sites instrumentés (Site Instrumenté de Recherche en Télédétection Atmosphérique, Observatoire de La Réunion), réunis au sein de l'infrastructure de recherche ACTRIS. Récemment de nouveaux développements ont permis de mesurer les aérosols à partir de vols ballon. C'est le cas du compteur d'aérosols LOAC et du lidar BeCOOL, deux instruments impliqués dans Stratéole-2 qui seront déployés pour la validation des produits aérosols AEOLUS, EarthCare et Mescal.

#### 2.1.3. Réponse aux perturbations des nuages

**Objectifs.** Les nuages jouent un rôle fondamental dans les bilans hydrique et énergétique du système climatique. Même si les modèles de climat s'accordent sur une rétroaction nuageuse globalement positive (renforcement du réchauffement), une forte disparité persiste entre les modèles.

**Bilan.** La stratégie d'analyse des observations spatiales aux échelles régionale et globale mise en place ces dernières années a permis d'améliorer la caractérisation des propriétés des nuages et la compréhension de leur cycle de vie. Les sondes Infrarouge IASI ou AIRS, sensibles aux nuages de la haute troposphère, ont permis de mieux cartographier la répartition géographique des nuages glacés et de mieux comprendre leurs processus

de formation en reliant par exemple la taille des enclumes à l'intensité de la convection. Les sondeurs micro-ondes MHS et AMSU ont permis de mieux quantifier les précipitations et de tester la capacité des modèles à bien les représenter, notamment en intensité et localisation géographique. L'exploitation des observations CALIPSO-CLOUDSAT a mené à la définition de nouveaux diagnostics climatiques nuageux grâce au développement de produits dédiés à la validation de modèles de circulation générale GOCCP (GCM-Oriented CALIPSO Cloud Product), dont la valorisation constitue une nouvelle piste de recherche fructueuse ainsi qu'un élément de pilotage important des missions spatiales futures comme Mescal. Dans les latitudes tropicales, la synergie radiomètre/lidar/radar AIRS-CALIPSO-CloudSAT a été exploitée pour estimer l'extension verticale et le taux de chauffage des nuages hauts en fonction de leurs propriétés physiques et de leur environnement thermodynamique. Les missions A-Train, Megha Tropiques, MSG et GERB ont également permis de mieux comprendre l'impact radiatif des systèmes convectifs de méso-échelle et d'évaluer leur représentation dans les modèles.

#### 2.1.4. Réponse aux perturbations : le cycle de l'eau

**Objectifs.** Le cycle de l'eau comporte trois boîtes interconnectées : la vapeur d'eau, les nuages et les précipitations. Toutes trois ont des caractéristiques très liées à l'échelle de l'observation, les deux dernières étant de plus affectées d'effets d'intermittence spatio-temporelle. Si, à partir des données spatiales, on peut assez bien restituer quantitativement la vapeur d'eau en moyenne atmosphère, c'est moins vrai pour les nuages et encore moins pour les précipitations.

**Bilan.** L'exploitation de l'ensemble des radiomètres hyperfréquences passifs a permis de mieux quantifier les précipitations à l'échelle globale et de tester la capacité des modèles à bien les représenter, notamment en termes d'intensité et de localisation géographique. En particulier, ces travaux ont conduit au développement et à la mise à disposition via AERIS, du produit pluie 1°x1° quotidien actuellement le plus performant sur l'Afrique de l'ouest. Grâce à l'apport du sondeur SAPHIR, la mission Megha-Tropiques (MT) a pleinement intégré le consortium Global Precipitation Mission (GPM). En réalisant la synthèse entre différents capteurs spatiaux en orbites géostationnaire et en orbites basses, il a été possible de suivre précisément le déplacement et l'évolution des systèmes convectifs afin de mieux documenter et comprendre leur cycle de vie. Ces activités se sont concentrées sur la région tropicale mais des actions sont aussi menées sur les comparaisons entre produits GPM et radars du réseau Météo-France sur la zone métropolitaine. Enfin, dans les régions polaires, la synergie CloudSat-Calipso a permis d'étudier la variabilité spatio-temporelle des propriétés microphysiques des nuages, l'impact des nuages sur la fonte de la calotte arctique, et les précipitations en Antarctique.

## 2.2. Météorologie, pollution et événements extrêmes

### 2.2.1. Dynamique atmosphérique

**Objectifs.** L'observation spatiale tient une part grandissante dans l'étude et la prévision numérique du temps, notamment à travers l'assimilation de données. Le soutien du CNES aux laboratoires français a permis de développer l'assimilation de nouveaux produits spatiaux.

**Bilan.** IASI a apporté une contribution significative à l'amélioration des prévisions par sa capacité à observer les profils verticaux de température et d'humidité. Les outils nécessaires à la future exploitation opérationnelle de IASI-NG ont été développés. L'assimilation des observations SAPHIR a été menée avec succès à Météo-France ainsi que dans 7 autres services météorologiques opérationnels. Son impact sur les prévisions s'est révélé positif grâce à sa capacité à observer fréquemment l'humidité et les systèmes convectifs dans la ceinture tropicale. Des produits de synthèse entre différents capteurs spatiaux en orbites géostationnaire et polaire ont été développés qui permettent de suivre précisément le déplacement et l'évolution de ces systèmes dans une optique de recherche. L'observation du profil vertical du vent à l'échelle globale est devenue une réalité grâce au lancement du satellite Aeolus de l'ESA en 2018. Aeolus va notamment fournir des données systématiques sur la haute atmosphère, peu documentée, que les campagnes ballons Stratéole-2 vont observer dans la bande équatoriale au cours de plusieurs campagnes de mesure. Des données d'un nouveau type – la détection des éclairs – vont être bientôt disponibles en opérationnel grâce au *Lightning Imager* à bord de MTG. Portant une information sur l'activité des orages, leur assimilation dans les modèles de prévision est en cours de développement. L'exploitation de la campagne de mesures Exaedre soutenue par le TOSCA va permettre de préparer l'exploitation scientifique de la mission. Le soutien du CNES a permis à des chercheurs français de proposer ou de se positionner sur des missions innovantes, comme le projet C3IEL ou la mission FORUM retenue par l'ESA en 2017 comme l'une des deux missions candidates à *Earth-Explorer 9* (EE9).

### 2.2.2. Pollution et qualité de l'air

**Objectifs.** L'observation spatiale de la composition de la troposphère, avec sa couverture spatiotemporelle sans équivalent, est une pierre angulaire du suivi de la pollution à l'échelle globale à haute résolution spatiale (~10 km). Cette surveillance s'inscrit à la fois dans la détection des événements de pollution extrême (feux, éruption, pollution urbaine), dans leur suivi à long terme et dans la quantification de leur impact sur la composition globale de l'atmosphère.

**Bilan.** Les instruments IASI ont contribué fortement aux avancées majeures dans le suivi de la pollution depuis l'espace. Les observations de monoxyde de carbone sont assimilées dans les Services Copernicus et permettent le suivi des feux, tels les feux indonésiens en 2015. Pour la première fois, grâce à IASI, l'identification à très haute résolution des points sources des émissions agricoles d'ammoniac a été possible depuis l'espace et a conduit à l'amélioration de la temporalité des inventaires d'émission d'épandage d'engrais. Ces travaux ouvrent la voie à l'amélioration des capacités des modèles de qualité de l'air à reproduire les pics de pollution. En parallèle, des approches multispectrales couplant les instruments IASI et GOME-2 sur Metop permettent d'assurer un suivi de la pollution à l'ozone au plus proche de la surface. Des travaux aux interfaces avec les surfaces continentales et la santé sont également développés, notamment pour caractériser la matière particulaire comme vecteur de maladies en zone sahélienne. La robustesse (validation/dérive) des séries temporelles des composés atmosphériques déduites de IASI, qui seront poursuivies par la mission IASI-NG, est régulièrement évaluée par la communauté et les premières séries, pour l'ozone notamment, ont pu être incorporées au rapport international sur l'ozone troposphérique (TOAR).

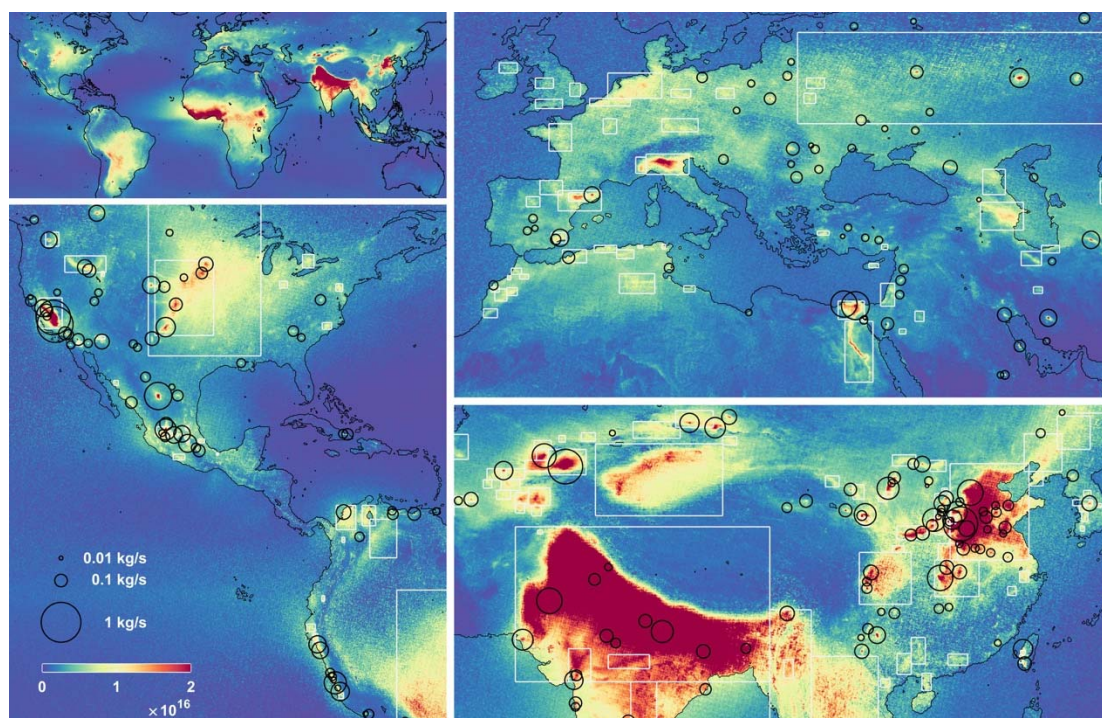


Figure 1 : Concentrations en ammoniac mesurée par IASI et restituée par un réseau de neurones. Ces concentrations ont permis d'identifier 450 sources. D'après Van Damme et al., *Nature*, 2018.

### 2.2.3. Phénomènes extrêmes

**Objectifs.** Les phénomènes extrêmes, météorologiques (orages, tempêtes des moyennes latitudes ou cyclones tropicaux) ou les éruptions volcaniques peuvent engendrer des pertes humaines et des dégâts matériels importants. Améliorer la prévision de ces phénomènes ou de leurs effets (transport de panache volcanique par exemple) est un enjeu de sûreté. Anticiper l'évolution de leurs caractéristiques (fréquence, intensité) dans le cadre du changement climatique est nécessaire pour construire une société plus résiliente. La compréhension des mécanismes physiques et dynamiques qui sont à leur origine fait partie des grands challenges fixés par le programme mondial de recherches sur le climat (WCRP).

**Bilan.** En balayant les gammes des micro-ondes et de l'infrarouge, les missions Megha-Tropiques et IASI ont permis d'améliorer la prévision des événements précipitants extrêmes grâce aux méthodes d'assimilation de données en zones nuageuses et pluvieuses. En particulier, l'intérêt de l'orbite tropicale de Megha-Tropiques pour l'amélioration de la prévision de la trajectoire des cyclones a été démontré. Les nouvelles observations par radar à synthèse d'ouverture des satellites Sentinel-1 ont prouvé leur meilleure sensibilité que les diffusiomètres plus classiques en cas de vents forts, adaptée aux cyclones tropicaux. De nouvelles missions dans lesquelles la communauté française est particulièrement impliquées (IRS/MTG, EarthCare, Metop-SG)

seront clés pour nourrir les structures SWFDP (Severe Weather Forecasting Demonstration Project) de l'OMM focalisées sur les événements intenses. Par ailleurs, l'instrument IASI participe désormais à la détection des éruptions volcaniques grâce à son inclusion dans les VAAC (Volcanic Ash Advisory Centers), pièces fondamentales de la Veille Volcanique des Routes Aériennes Internationales.

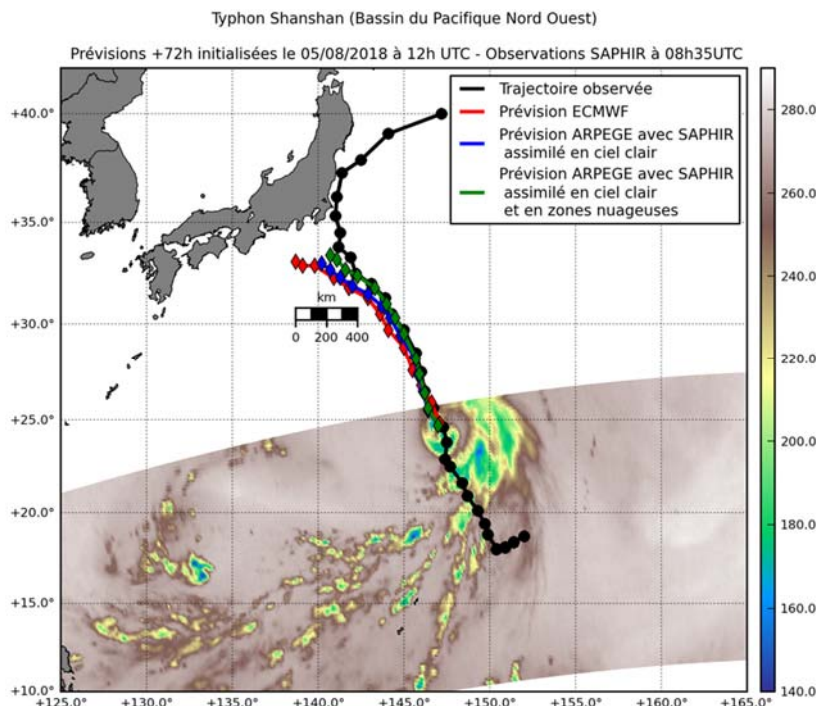


Figure 2 : Amélioration de la prévision de la trajectoire d'un cyclone grâce à l'assimilation des températures de brillance mesurée par SAPHIR sur Megha-Tropiques. D'après Duruisseau et al., *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019, <https://doi.org/10.1002/qj.3456>.

## 2.3. Sciences de l'observation

### 2.3.1. Interaction rayonnement/atmosphère.

**Objectifs.** Le développement et l'exploitation des instruments spatiaux de télédétection reposent sur la bonne connaissance de l'interaction rayonnement/atmosphère. C'est pourquoi une attention particulière est apportée depuis de nombreuses années à l'accompagnement des développements en physique de la mesure, spectroscopie, modélisation directe et inverse du transfert radiatif atmosphérique et simulateurs d'observables.

**Bilan.** Suite aux recommandations du workshop national TRATTORIA-II en 2015, le développement de codes de transfert radiatifs couvrant plusieurs domaines spectraux a été réalisé, à l'image des codes 4A (référence de plusieurs missions nominales) et ARTDECO. Une attention particulière a été portée à l'amélioration de différents processus radiatifs (diffusion). L'exploitation et la préparation des missions du CNES a fait apparaître la nécessité d'une amélioration de la connaissance de la spectroscopie dans des domaines bien connus mais désormais couverts par une haute résolution spectrale (infrarouge thermique pour IASI/IASI-NG, raie à 183 GHz pour Saphir) ou plus exploratoire (proche infrarouge pour Merlin ou MicroCarb). Ces données sont regroupées au sein de la base de données GEISA dont les mises à jour régulières sont soutenues par le CNES. Ces dernières années ont été marquées par le développement d'inversions multispectrales basées sur l'exploitation simultanée de missions couvrant diverses régions spectrales (IR/UV, IR/SWIR, IT/MO). L'ensemble de ces travaux a permis le développement de simulateurs de missions spatiales toujours plus complexes (à l'image du simulateur de Merlin qui permet de relier concept instrumental du lidar IPDA et colonne intégrée de méthane) et de mettre au point de méthodes originales d'étalonnage des missions spatiales, cruciales dans le cadre du suivi des variables climatiques essentielles, basées sur le suivi des différences entre radiances observées et simulées.

### 2.3.2. Conception et réalisation instrumentales du futur

**Objectifs.** L'observation du Système Terre, la validation des missions spatiales et le développement d'expériences spatiales novatrices exigent un arsenal expérimental performant, adapté et bénéficiant des derniers progrès technologiques. Les activités de développement de nouveaux capteurs et porteurs sont donc essentielles.

**Bilan.** Ces dernières années ont vu émerger plusieurs instruments permettant la mesure de profils verticaux de différents composants atmosphériques à des fins de validation des missions spatiales, d'étude de leur transport vertical et horizontal, ou d'étude de couches atmosphériques peu accessibles depuis l'espace (couche limite, haute troposphère/basse stratosphère). C'est particulièrement le cas pour les gaz à effet de serre : échantillonneurs atmosphériques (AirCore), spectromètres à diode laser (Amulse, pico-SDLA, SPECIES). Leur exploitation a permis de mettre en évidence, pour la première fois, une surestimation systématique du méthane par les modèles de transport atmosphérique couramment utilisés par la communauté. Afin de préparer les missions actives du futur, les lidars ont fait l'objet de nombreux développements que ce soit pour les mesures in-situ (lidar WaVil pour la vapeur d'eau et la température) ou pour préparer les futures missions spatiales (lidar CoWi dont les premières mesures de CO<sub>2</sub> ont été obtenues). Des campagnes de mesures ambitieuses, soutenues par le CNES et d'autres partenaires, ont été organisées (NAWDEX, AEROCLOUD-SA, MAGIC, EXAEDRE...). Elles ont permis d'étudier plus en détails différents processus atmosphériques, de valider et d'améliorer les algorithmes de restitutions de diverses variables à l'image du système RALI (lidar LNG-HRS et radar W RASTA) utilisé pour évaluer l'algorithme Dardar de restitution des paramètres nuageux à partir des données CloudSat/Calipso et préparer EarthCare et Mescal.

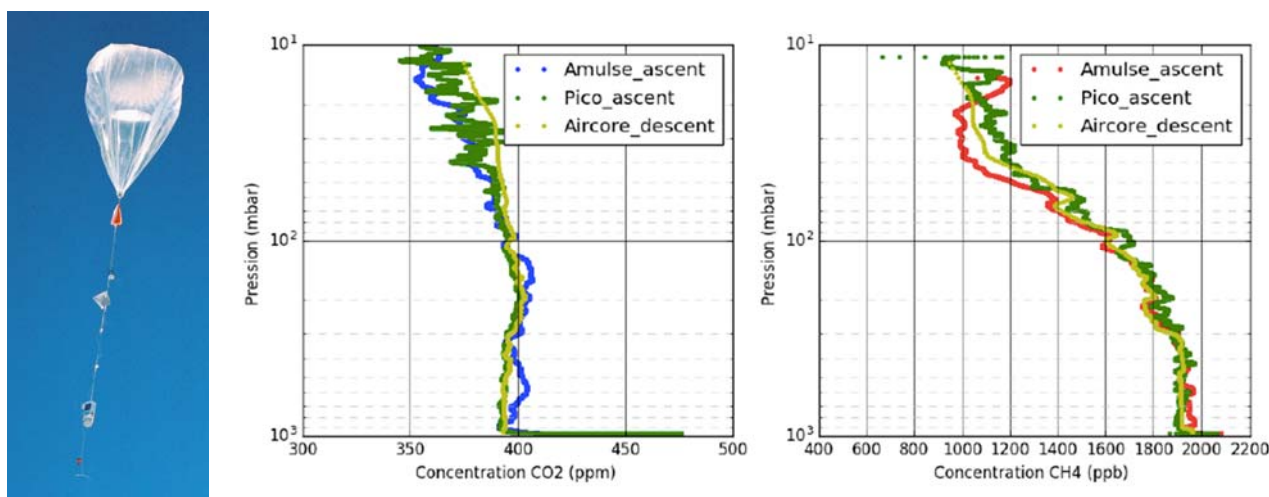


Figure 3 : Profils verticaux jusqu'à 10hPa (environ 30km d'altitude) de CO<sub>2</sub> (à gauche) et de CH<sub>4</sub> (à droite) mesurés par les systèmes de mesure Amulse, pico-SDLA et Aircore sous ballon stratosphérique ouvert (BSO). Ces systèmes seront utilisés pour la validation des futures missions spatiales MICROCARB et MERLIN.

## 2.4. Structuration de la communauté

**Appel à Projet de Recherche.** De nombreuses évolutions ont marqué l'évaluation des propositions annuelles de recherche ces 5 dernières années. La nécessité d'assurer une visibilité sur le soutien que le CNES apporte à l'exploitation (Megha-Tropiques, Calipso, IASI) ou à la préparation (IASI-NG, Merlin, MicroCarb) de ses missions, ainsi qu'au fonctionnement des dispositifs nationaux jugés indispensables (Services d'Observation, Sites Instrumentés, Plateformes) font désormais l'objet d'une demande d'un soutien pluriannuel. Autre évolution notable, l'évaluation des propositions basées sur l'utilisation de ballons est désormais effectuée par le TOSCA, avec sollicitation du CS LEFE. Ces évaluations sont ensuite transmises au nouveau Comité Technique Ballons. Le groupe Atmosphère a noté avec satisfaction la part grandissante de propositions scientifiques recourant aux ballons. Plus généralement, le nombre de propositions coordonnées, dans le sens où elles regroupent l'ensemble des équipes et des activités s'appuyant sur une plate-forme ou un instrument, a été en augmentation : EECLAT (10 labos), IASI (9 labos), IASI-NG (7 labos), SOLID/LI (7 labos), MAGIC (7 labos), MINO2S (7 labos), Megha-Tropiques (5 labos), Merlin (5 labos), MicroCarb (5 labos), Stratéole-2 (5 labos), Aeolus (4 labos) et C3IEL (4 labos). Cette structuration permet une bonne animation des communautés impliquées dans l'exploitation de ces missions et est complétée par l'établissement de groupes missions. Le rôle de PI scientifique reste cependant très disparate d'une mission à l'autre et mériterait une meilleure reconnaissance.

**AERIS.** La communauté française a, dans un effort d'homogénéisation, regroupé l'ensemble des données et produits Atmosphère dans le pôle AERIS. Organisation incontournable pour fournir des données brutes et des produits associés, avec le label « FAIR », à tous les utilisateurs, AERIS permet de disséminer les produits phares issus du traitement des missions nominales du CNES et offre un tremplin vers Copernicus (services Atmosphère CAMS et Climatologie C3S) et GEOSS (Global Earth Observation System of Systems). Au-delà de la simple dissémination, la prise en main de chaînes de traitement développées dans les laboratoires de

recherche est possible une fois atteint un degré satisfaisant de maturité, afin qu'AERIS en assure la production, voire l'exploitation des données.

**Infrastructures de recherche.** Le développement en cours ou à venir des infrastructures de recherche au niveau français et européen (ACTRIS et ses différentes composantes, IAGOS et ICOS déjà opérationnelles), est un gage de disponibilité de longues séries de données de qualité standardisée. Ce sont des organisations indispensables à la validation des observations satellitaires, à leur intercomparaison, et à la vérification des éventuelles dérives temporelles. Les bases de données acquises par ces IR sont également utilisées pour des études de tendance et de processus fournissant ainsi des diagnostics et des métriques pertinentes pour vérifier la cohérence des produits spatiaux (exemple de l'activité TOAR pour l'ozone). Au cours des 5 dernières années, des demandes récurrentes de soutien de base au fonctionnement des dispositifs nationaux tels que réseaux (NDACC, AERONET/PHOTONS), super sites d'observation (SIRTA, OHP), plateformes ou instruments nationaux (plateforme aéroportée PMA) ont été financées. Les activités autour de SAFIRE - EUFAR (avions de recherche) et HEMERA (ballons) sont essentielles pour compléter les dispositifs relevant des stations de surface (ACTRIS, ICOS) ou d'avions commerciaux (IAGOS). Notons que le besoin se fait aussi de plus en plus pressant pour une fourniture des données en temps (quasi)réel afin de satisfaire les besoins d'assimilation et/ou de vérification immédiate des produits d'assimilation.

### 3. Recommandations du groupe

#### 3.1. Nuages, convection, précipitations

Les recherches qu'entend mener la communauté française s'articulent autour de trois grandes questions : (i) *Comment observer, comprendre et attribuer la variation des propriétés des nuages et des précipitations ?* (ii) *Quel est l'effet des conditions environnementales à grandes et petites échelles sur les processus nuageux ?* (iii) *Quels processus physico-dynamiques conduisent à des événements météorologiques extrêmes ?*

La première question nécessite d'observer les nuages et les précipitations pour comprendre l'évolution de leurs propriétés et les processus microphysiques, dynamiques et radiatifs associés. La future combinaison d'instruments micro-ondes à bord de Metop-SG (MWI et ICI) devrait combler un manque pour l'observation des variables condensées en observant l'eau sous toutes ses phases. Des gouttes de pluies jusqu'aux hydrométéores en phase solide, ces variables seront mieux observées grâce à Metop-SG, en particulier grâce aux nouvelles fréquences submillimétriques d'ICI exploitées pour la première fois au niveau mondial. Cette capacité pourrait être renforcée avec la mission FORUM (IR lointain) actuellement en course dans le cadre EE09.

Le transport des variables condensées au sein des nuages reste très peu observé bien qu'il constitue un élément clé de la convection. Le radar Doppler d'EarthCare permettra de le mesurer, mais sans vision tridimensionnelle car ce radar sera à visée au nadir. EarthCare pourrait être complété par les missions C3IEL et C2OMODO proposées par la communauté, visant toutes deux à restituer des flux verticaux à partir d'images successives observées par des trains de satellites, l'un dans le domaine visible pour le sommet des nuages, et l'autre dans le domaine des micro-ondes pour l'intérieur des nuages en phase glace.

La détection et l'attribution de tendance climatique sera également un sujet d'étude critique dans les années à venir. Il paraît vital de consolider et pérenniser les longues séries temporelles d'observations des nuages déjà disponibles. La mission MESCAL revêt de ce fait une importance capitale en prolongeant au-delà d'EarthCare la série temporelle des mesures lidar démarrée en 2006 avec CALIPSO.

La deuxième question nécessite d'observer à la fois la vapeur d'eau, la dynamique atmosphérique et les flux radiatifs de surface dans l'environnement des nuages ainsi que la variabilité des propriétés physico-chimique des aérosols. Les deux futures missions IASI-NG à bord de Metop-SG et IRS à bord de MTG permettront d'améliorer la résolution verticale des mesures de vapeur d'eau, principalement en haute troposphère/basse stratosphère. A noter que la troisième génération d'IASI sera discutée dès 2024 dans le cadre EPS-TG. Les équipes françaises devront se mobiliser pour faire valoir leurs besoins. Ces systèmes d'observation pourraient être complétés par des instruments actifs proposés par la communauté, tel que le lidar vapeur d'eau de la mission WALISS. Celui-ci devrait permettre une meilleure description des champs de vapeur d'eau notamment dans les basses couches de l'atmosphère. AEOLUS permet d'estimer pour la première fois depuis l'espace la dynamique à grande échelle. La suite de la mission sera sans doute envisagée dans un cadre européen sous la conduite d'EUMETSAT. Les mesures aéroportées sont encore indispensables pour observer les structures spatiales plus fines. L'observation de la variabilité des aérosols devrait bénéficier du futur imageur 3MI à bord de MetOp-SG. La documentation de cette variabilité pourrait également être grandement améliorée grâce à un lidar multi-longueur d'ondes et à haute résolution spectrale tel que MESCAL.

Enfin, l'observation des événements extrêmes est une thématique qui nécessite en premier lieu une haute répétitivité des mesures pour être compatible avec la vitesse d'évolution des phénomènes. La nouvelle génération de satellites géostationnaires devrait être utile pour ces études, en particulier grâce aux croisements d'informations possible entre les capteurs dans l'infrarouge tels que FCI (MTG) ou ABI (GOES-16, 17) et les nouveaux instruments de mesure de l'activité électrique dans les nuages (MTG/LI, GOES-R/GLM). En complément de ces observations, le déploiement de constellations de petits satellites pourrait être étudié afin d'améliorer la répétitivité des mesures dans différentes longueurs d'ondes, de l'hyper-spectral infrarouge jusqu'aux micro-ondes.

### 3.2. Forçages radiatifs

Simuler l'évolution du bilan radiatif du globe reste un défi majeur, renforcé par la difficile modélisation du forçage direct et indirect de certaines composantes atmosphériques. La réduction des incertitudes passe ici par une meilleure représentation des processus d'absorption et d'émission de carbone, une compréhension plus fine des interactions aérosols-nuages, une description plus précise du transport de la vapeur d'eau dans la stratosphère ainsi qu'une meilleure représentation de l'évolution de la concentration d'ozone.

Pour cela de nouvelles observations sont nécessaires comme celles des missions MicroCarb et Merlin (quantification des puits et des sources de CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>), celles de la mission sentinelle 5 (mesure des concentrations de H<sub>2</sub>O et O<sub>3</sub> dans la stratosphère), celles des ballons Stratéole 2 (description des échanges troposphère-stratosphère) ou de la mission 3MI (caractérisation fine des propriétés des aérosols - nature et concentrations - et de leurs interactions avec les nuages). Des campagnes aéroportées sont indispensables pour valider ces nouvelles observations satellitaires mais également pour tester de nouvelles méthodes permettant par exemple d'améliorer notre connaissance de la nature des aérosols et de leur répartition verticale (au-dessus, en-dessous et dans les nuages).

Les projets de mission CO2M/Sentinel 7 (CO<sub>2</sub> à haute résolution spatiale) prévue dans le cadre des High Priority Copernicus mission, ou NanoCarb retiennent l'intérêt de la communauté en prolongeant et en améliorant sensiblement la capacité d'observation du carbone à l'échelle globale au-delà de MicroCarb. La mission FORUM opposée à SKIM dans le cadre EE9, pourrait améliorer notre compréhension du bilan radiatif dans l'infrarouge lointain bien adapté aux régions froides.

Certains verrous ne pourront être levés que par (1) des mesures plus précises (en termes de radiométrie, de résolution spectrale, et spatiale) incluant une dimension temporelle (mesures continues) et 3D (constellation de nano-satellites), (2) le développement de nouvelles observables (Lidars vapeur d'eau), (3) l'avènement de simulateurs d'observables plus réalistes (code de transfert radiatif 3D) et plus rapides, et (4) l'amélioration des bases de données spectroscopiques et d'indice des aérosols, qui dépend de leur composition, sur tout le spectre actuellement mesuré.

### 3.3. Qualité de l'air et gaz réactifs

Tant pour les questions relatives au climat qu'à la qualité de l'air, cette dernière décennie a marqué un saut quantitatif et qualitatif dans la surveillance depuis l'espace de la pollution à l'échelle globale aussi bien pour la détection d'événements extrêmes (feux, éruption, pollution urbaine) que pour le suivi à long terme des principaux gaz réactifs et gaz à effet de serre. En parallèle, parce qu'indispensables au système global d'observation/prévision, les modèles et les programmes pérennes d'observations in-situ se sont aussi développés pour permettre des avancées significatives avec par exemple les services atmosphère et climat de Copernicus (CAM5 et C3S). Toutefois, plusieurs challenges nous attendent encore pour les années à venir, afin de rendre complètement efficaces les politiques de régulations par le suivi et la prévision des polluants clés, à différentes échelles de temps et d'espace :

- tendre à une observation tridimensionnelle des polluants (ozone et aérosols notamment) en passant du suivi des colonnes troposphériques à la séparation des couches clés (couche limite, troposphère libre, haute troposphère-basse stratosphère, stratosphère). L'utilisation en synergie des capteurs UV/Vis et IR à bord de Sentinel 4/5 et le développement de nouvelles technologies actives multi-longueurs d'onde (MESCAL) devraient permettre d'avancer en ce sens.
- passage de la mesure optique intégrée de l'aérosol (AOD) à la spéciation chimique et à la distribution en taille des aérosols. Là encore l'exploitation Metop et Metop-SG/Sentinel 5 devrait apporter de nouvelles informations. Le développement de lidars multi longueurs d'onde et à haute résolution spectrale, comme MESCAL, devrait permettre également d'apporter une meilleure contrainte pour discriminer l'origine des aérosols et comprendre leur évolution au cours du transport.
- accéder à la distribution spatio-temporelle des concentrations et des émissions des précurseurs organiques (COVs) et inorganiques (NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>) des polluants secondaires. Ce challenge



doit être relevé pour répondre aux enjeux sociétaux liés à la régulation de la qualité de l'air et à la limitation de son impact sur la santé et les écosystèmes. Le soutien à l'exploitation des Sentinelles 4 et 5 et de Metop-SG en ce sens est indispensable.

- Mieux séparer les contributions anthropique et naturelle des émissions et leur évolution.

En retour, les observations spatiales ont également un rôle important à jouer pour mieux contraindre les modèles atmosphériques et leur capacité à simuler la grande diversité de la composition atmosphérique dont les aérosols secondaires sont une part très incertaine. En troisième pilier du système global, les observations in-situ (sols, aéroportées) sont indispensables aux opérations de cal/val et l'évaluation incessante des modèles en mode prévision ou réanalyses. Cette synergie entre les mesures (sols, aéroportés, ballons, satellites) et la modélisation est la seule stratégie efficace pour surveiller l'atmosphère et vérifier l'application des protocoles internationaux.

### 3.4. Observations au sol, sous ballon et aéroportées

La nécessité de disposer de moyens d'observation au sol, sous ballon ou à partir d'avions a été soulignée à plusieurs reprises. Ces moyens demeurent nécessaires pour accéder à certains milieux d'intérêts (nuages par exemple) avec des résolutions spatiales et temporelles suffisantes pour comprendre les processus physiques de petite échelle. Ils constituent un investissement certes coûteux, mais qui facilite et sécurise le développement de nouveaux capteurs et des chaînes de traitement numériques associées en confrontant les techniques à des données réelles acquises dans un environnement et avec des géométries qui se rapprochent du spatial. Ils permettent de réaliser des mesures nécessaires à la mise au point des algorithmes d'inversion des signaux acquis à bord des satellites (propriétés physiques ou optiques des différents types d'aérosols par exemple). Ils peuvent enfin être utilisés pour valider les mesures spatiales et les étalonner, ce qui est indispensable pour garantir la fourniture de longues séries de données sans dérive instrumentale, indispensable pour les études sur le changement climatique.

Les ballons stratosphériques constituent aujourd'hui l'unique moyen d'accéder à la basse stratosphère dont les propriétés thermodynamiques et chimiques sont cruciales pour la compréhension de phénomènes tels que la couche d'ozone. L'après Stratéole 2 devra être envisagé sur la base des résultats obtenus.

Le risque de ne plus disposer de jet au-delà du Falcon 20 de SAFIRE est problématique alors que la communauté s'apprête à exploiter, entre autres, trois nouvelles missions dédiées à la composition chimique de l'atmosphère. Très innovantes, ces missions vont en effet requérir un gros travail de développement des chaînes de traitement des données qu'un démonstrateur aéroporté permet d'accélérer et de faciliter.

### 3.5. Sciences de l'observation.

La précision des mesures de concentration des espèces chimiques détectées depuis l'espace repose sur une connaissance fine de leurs propriétés spectroscopiques. Améliorer celles-ci est indispensable si l'on veut atteindre les spécifications de missions telles que MERLIN ou IASI-NG. La communauté française maintient et améliore depuis de nombreuses années la base de données GEISA. Coordinée entre missions, ce travail devra être poursuivi en mettant l'effort tout particulièrement sur les bandes spectrales des missions à venir.

L'inversion des flux d'énergie captés par les instruments spatiaux en propriétés chimiques ou thermodynamiques passe par un code numérique de transfert radiatif. Ceux-ci doivent être à la fois précis et rapides pour pouvoir traiter en un temps raisonnable, notamment dans un cadre opérationnel, la masse toujours croissante des données acquises. Ces deux qualités, contradictoires, ne pourront continuer à être mariées qu'au prix d'un effort de recherche et de développement.

Il est aujourd'hui courant d'exploiter les mesures spatiales à l'aide d'un « opérateur d'observation » traduisant en observation spatiale un état de l'atmosphère prévu ou simulé par un modèle numérique. Le code de transfert radiatif cité au paragraphe précédent en est un exemple. L'opérateur d'observation permet de fusionner des observations de différents types de capteurs à des états modélisés intégrant les connaissances disponibles sur la physique du milieu étudié. Cette fusion permet de contraindre un modèle de prévision opérationnelle à demeurer proche de la réalité (assimilation de données), ou bien de réaliser des séries de longue durée de données cohérentes indispensables pour l'analyse ou l'attribution des évolutions climatiques. En amont des missions, elle permet aux partenaires du CNES (CNRS, Météo-France...) de réaliser des études sur l'apport prévisible des mesures et d'affiner les spécifications. L'opérateur d'observation doit être considéré comme partie intégrante d'une mission spatiale.

Croiser des volumes croissants de données provenant aussi bien du spatial que d'observations réalisées dans les observatoires ou pendant des campagnes de mesure est une gageure que les bases de données telles

qu'AERIS doit relever. Ces pôles de données doivent continuer à se développer et une interopérabilité des différents pôles thématiques est à envisager pour faciliter les recherches sur les interfaces entre compartiments.

La quantité de données spatiales va croître exponentiellement dans les années qui viennent. Disposer de moyens de communications et de calcul suffisamment puissants est indispensable, mais il faudra aussi exploiter les capacités offertes par les techniques d'intelligence artificielle en plein développement. Les chercheurs commencent à se les approprier. Favoriser leur diffusion est un enjeu de formation pour les années qui viennent.

### 3.6. Synthèse des recommandations

Type de mesure/d'observables	Cadre de réalisation	R&T associée	Thème scientifique
Nature, spéciation chimique, propriétés physiques et optiques des aérosols	MESCAL (ccop. NASA)	Lidar multi-λ à haute résolution spectrale	Aérosols/nuages
Contenu en CO <sub>2</sub>	COPERNICUS Sentinel 7 (CO2M)		Puits et sources de carbone
Nuages (microphysique et dynamique)	C3IEL C2OMODO		Interaction nuage/climat, prévision des précipitations, événements extrêmes
Renouvellement jet	A définir		Toutes thématiques
Rayonnement IR lointain	FORUM (EE09) <sup>1</sup>		Bilan radiatif, nuages froids, chimie stratosphérique
Humidité des sols	SMOS-HR/ULID <sup>2</sup>		Cycle de l'eau
Humidité des sols, contenu intégré en vapeur d'eau	GCLASS (EE10) <sup>3</sup>		Cycle de l'eau
Champ 3D d'humidité		Lidar vapeur d'eau	Nuages, changement climatique

<sup>1</sup> La mission FORUM actuellement en course dans le cadre EE9 offre un intérêt pour l'étude de l'atmosphère (bilan radiatif dans l'IR lointain, nuages froids...). La communauté française s'y impliquerait si elle devait être finalement retenue par l'ESA.

<sup>2</sup> L'humidité des sols contraint les échanges d'énergie entre la surface continentale et l'atmosphère. Elle présente un intérêt pour les études sur le cycle de l'eau, la convection, la prévisibilité de l'état de l'atmosphère à des échelles de temps de quelques semaines...

<sup>3</sup> Parmi les 3 missions en lice dans le cadre EE10, G-CLASS présente un intérêt certain pour la météorologie (détection et quantification des flux d'humidités en Méditerranée avant qu'elles n'abordent les côtes européennes ; convection en Afrique). Cet intérêt devra être précisé une fois connue la précision de mesure et les capacités d'échantillonnage spatiale et temporelle.