

GROUPE THÉMATIQUE ATMOSPHÈRE

Philippe Chambon (président), Frédéric Chevallier, Juan Cuesta, Alain Dabas (président sortant), Carole Deniel (thématicienne), Adrien Deschamps (thématicien), Fabrice Jégou, Lilian Joly, Laurent Labonnote, Cécile Mallet, Nathalie Philippon, Fred Szczap, Solène Turquety

Objectifs scientifiques. L'analyse des phénomènes atmosphériques est cruciale pour mieux comprendre notre système climatique. La compréhension des cycles des gaz à effet de serre (GES), contributeurs clés au changement climatique, demeure encore insuffisante de même que la compréhension des mécanismes qui influencent la formation des nuages et des précipitations en lien avec la charge en aérosols dans l'atmosphère. Les composés chimiques réactifs ont aussi un impact, direct et indirect, sur le climat et la qualité de l'air nécessitant d'être mieux documenté. Améliorer nos connaissances sur ces sujets permettent également de répondre à certains défis auxquels notre société est confrontée. En particulier, notre capacité à nous adapter au changement climatique dépend de notre aptitude à mieux anticiper les conséquences des phénomènes extrêmes tels que les tempêtes, les fortes précipitations, les canicules et sécheresses, les éruptions volcaniques, les méga-feux... L'observation de la Terre depuis l'espace est un outil essentiel pour avancer sur ces problématiques, en synergie avec les mesures depuis la surface, les mesures par ballons et avions dites « mesures suborbitales » et la modélisation numérique du système Terre.

Contexte. Les années à venir verront une forte croissance du volume des données spatiales disponibles avec la montée en puissance du programme Copernicus, et le renouvellement complet de la flotte de satellites d'observation de la Terre d'EUMETSAT. Ceci va obliger les acteurs à se concentrer sur le traitement, la modélisation et l'exploitation des données ainsi que sur la définition de besoins en observations complémentaires aux observations spatiales, telles que celles exploitant les moyens de la nouvelle Infrastructure de recherches IN AIR (Infrastructure Nationale des Aéronefs Instrumentés pour la Recherche). Il est également probable que nous franchissions un cap dans le domaine des sciences de l'environnement avec l'avènement de l'intelligence artificielle (IA) qui permet des traitements complexes d'énormes quantités de données de manière très rapide et automatique. Cette révolution technologique passera par un effort continu de mise à disposition des données FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) que le pôle de données atmosphériques AERIS, maintenant largement utilisé par la communauté, anticipe.

1. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2019

1.1. AÉROSOLS, GAZ RÉACTIFS ET QUALITÉ DE L'AIR

Les processus de transformation et la répartition spatiale, notamment verticale, des principaux polluants que sont l'ozone, les aérosols et leurs précurseurs, sont encore imparfaitement connus. La pollution par ces composés est une menace pour la santé humaine.

Ces dernières années, l'observation spatiale des polluants a beaucoup progressé grâce au développement de chaînes d'inversion, à partir d'un ou plusieurs capteurs en synergie. Ainsi, il est maintenant possible de produire des cartes de la concentration en NH_3 à partir des données du sondeur **IASI**, et d'observer comment celle-ci varie à l'échelle locale, en lien par exemple avec les activités agricoles.

D'immenses feux de forêts ont également défrayé la chronique avec la question de leur attribution dans un contexte de changement climatique. Ces feux ont fait l'objet d'études spécifiques allant de la caractérisation des émissions (panaches) au transport à longue distance avec leur impact sur la qualité de l'air (Fig. 1).

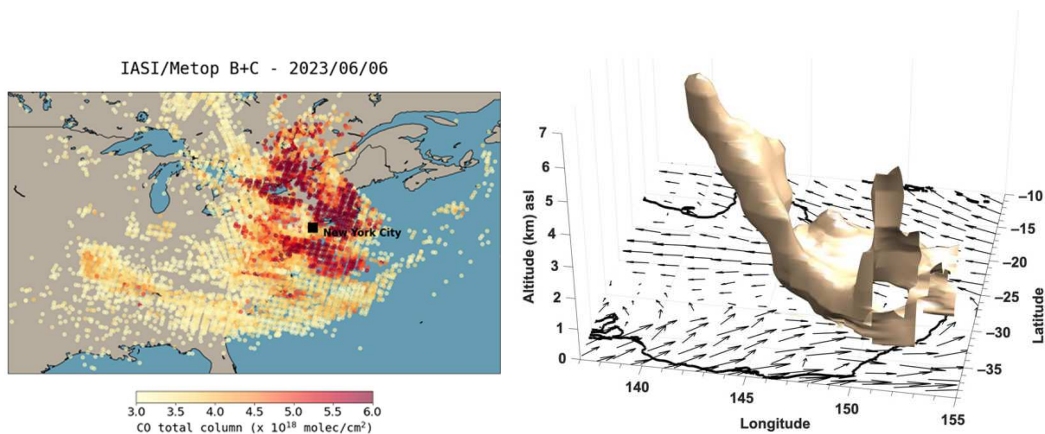


Fig. 1 : (gauche) Concentration en monoxyde de carbone (CO) mesurée par les instruments **IASI** à bord des satellites **MetOp-B** et **MetOp-C**, montrant l'impact des feux sur la qualité de l'air de la ville de New-York. Crédit : Cathy Clerbaux (LATMOS/IPSL). (droite) Cartographie tridimensionnelle des panaches de feux de forêt australiens et leur injection dans l'atmosphère à l'échelle journalière, observée pour la première fois par le capteur satellitaire **TROPOMI (Sentinel 5P)**. © Lemmouchi et al., 2022.

1.2. NUAGES, CONVECTION ET PRÉCIPITATIONS

Les nuages jouent un rôle fondamental dans le bilan radiatif du système climatique et plusieurs missions clés pour leur étude seront lancées dans un avenir proche. Par exemple, les équipes françaises ont déjà réalisé de nombreux travaux pour préparer l'exploitation des données des **MetOp-SG** (2025) et du radar-lidar de la mission **EarthCARE** (2024).

La mission **AEOLUS** utilisant pour la première fois un Lidar-Doppler depuis l'orbite a démontré entre 2018 et 2023, sa capacité à améliorer notre connaissance du champ de vent, notamment sous les tropiques et dans la basse stratosphère où la convection induit des circulations de grande échelle, avec un impact très important sur la qualité des prévisions de vent des modèles globaux via l'assimilation, motivant EUMETSAT à proposer à ses états membres une suite opérationnelle (programme **EPS-Aeolus**) à l'horizon 2030.

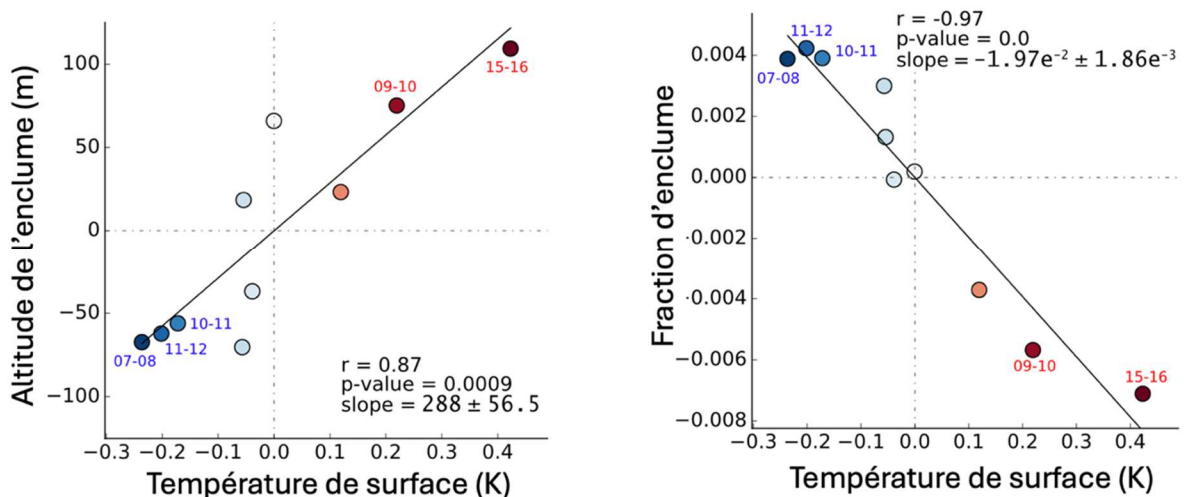


Fig. 2: Évolution de l'altitude des enclumes (à gauche) et de leur fraction (à droite) en fonction de l'accroissement de température de surface à l'échelle inter-annuelle en utilisant les observations du Lidar **Caliop/CALIPSO**. Les valeurs sont des moyennes tropicales (30S-30N) annuelles (juillet à juin). © Saint-Lu et al., 2020.

La détection de tendances climatiques, primordiale pour comprendre notre climat futur, nécessite l'acquisition de longues séries temporelles. Grâce à sa longévité, **CALIPSO** (2006-2023) a permis

par mesure LIDAR des nuages, de mettre en évidence un effet de « stabilité » ou effet « d'Iris » qui consiste en la rétractation de la surface des enclumes lors d'un réchauffement local (Fig. 2). L'évolution de cette surface a un impact sur l'effet radiatif attribué aux nuages ainsi que sur les précipitations associées.

Enfin, l'étude des orages a bénéficié du lancement récent de l'imageur d'éclairs en orbite géostationnaire **GLM** sur **GOES-16** et **18**. En préparation à l'exploitation de **MTG/LI**, il a été montré que l'assimilation de ces mesures améliore la prévision d'évènements météorologiques à fort impact.

1.3. FORÇAGES RADIATIFS ET GAZ À EFFET DE SERRE

Les études permettant de mieux comprendre les flux des espèces chimiques absorbantes, dont les GES, sont très structurées en France par la préparation des missions **MicroCarb**, **CO2M**, **MERLIN**, **GeoCARB** (pour le CO₂ et le CH₄), **Sentinel 5** (pour H₂O et O₃ dans la stratosphère).

Ces dernières années, le focus des missions sur le CO₂ atmosphérique a évolué des flux naturels vers les émissions anthropiques, en ciblant les panaches issus de villes ou d'installations industrielles. L'identification des sources de CH₄ a progressé grâce au spectro-imageur **TROPOMI** sur **Sentinel-5P** et aux capteurs hyper-spectraux (**S2**, **S3**, **PRISMA**, **EMITS**...).

Les données du spectromètre infrarouge **IASI** apportent des informations dans le suivi des GES anthropiques. On relèvera à ce titre l'étude de « l'excès troposphérique diurne » (DTE) du CO₂ vu par **IASI** (Fig. 3) mettant en exergue l'apport de la constellation des 3 sondeurs de la série.

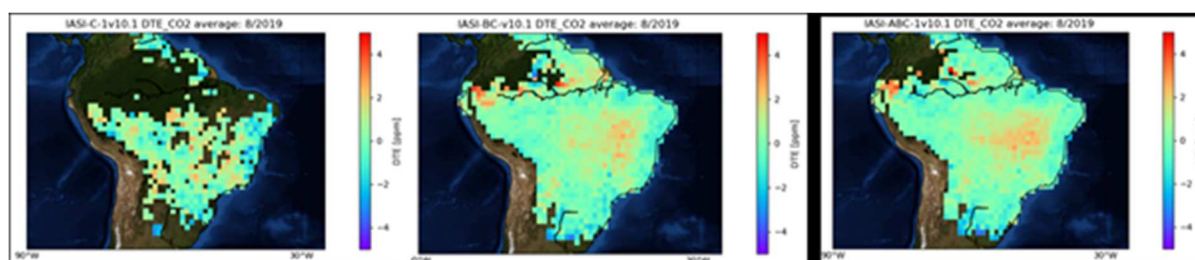


Fig. 3 : Estimation de l'excès diurne troposphérique de CO₂ pour le mois d'août 2019 à partir des observations de **IASI-C** (gauche), de **IASI-B** et **C** (milieu) et de **IASI-A**, **B** et **C** (droite). L'utilisation de 2 et 3 **IASI** permet d'augmenter significativement la couverture spatiale et de réduire le bruit, en faisant apparaître clairement les émissions de CO₂ au-dessus de l'arc de déforestation brésilien. © LMD/IPSL.

La préparation des futures missions GES a fait l'objet d'un effort très conséquent avec le projet long terme **MAGIC** (Monitoring of Atmospheric composition and Greenhouse gases through multi-Instruments Campaigns) pour lequel ont été réalisés des développements instrumentaux, des inter-comparaisons de capteurs pour apprécier leurs qualités respectives, et la mise au point de dispositifs et de méthodologies adaptés.

1.4. TRAVAUX D'ACCOMPAGNEMENT ET PRÉPARATOIRE DES MISSIONS ACTUELLES OU PRÉVUES

Concernant les données spectroscopiques documentant les raies d'absorption et les propriétés de diffusion des hydrométéores et/ou des aérosols, la mise en orbite dans un avenir proche d'instruments explorant de nouvelles parties du spectre électromagnétique a motivé des travaux spécifiques. On peut notamment citer l'infrarouge lointain pour la mission **FORUM** et le domaine micro-ondes submillimétriques pour l'instrument **ICI** à bord de **MetOp-SG**. Ceci a nécessité un travail particulier afin que les différentes raies d'absorption ainsi que les propriétés de diffusion soient documentées dans ces longueurs d'onde. Pour les parties du spectre déjà connues, des travaux de pointe ont aussi pu être menés afin de progresser sur certains points clés pour l'exploitation de futurs instruments. Dans les bandes spectrales de **MicroCarb**, des études ont permis d'améliorer notre

connaissance des paramètres spectraux avec dépendance en température de la bande du CO₂ (à 1,61 μm) et une caractérisation de l'absorption d'O₂ (0,76 μm) meilleure que le pourcent.

Concernant le transfert radiatif, des développements innovants ont été réalisés pour prendre en compte les effets tridimensionnels de la propagation du rayonnement dans les nuages en préparation des missions **EarthCARE** et **C3IEL**, permettant dans le cas de **C3IEL** de guider les études de dimensionnement.

Concernant les algorithmes d'inversion, il est important de noter l'importance croissante de l'IA. La Fig. 4 compare une restitution de la pluie à partir de données radars à ce que peut faire l'IA avec les données d'un radiomètre passif (algorithme DRAIN).

Enfin, il est à noter les avancées récentes concernant la spécification de futures missions spatiales. On peut citer les premiers travaux français d'expériences de simulations de systèmes d'observation à l'échelle du globe, permettant d'évaluer, l'apport sur la qualité de la prévision météorologique, de futures missions comme la constellation **CMIM** (pour « Constellation de Mlni sondeurs pour la Météorologie ») ainsi que la constellation **EPS-Sterna**, le lidar **EPS-Aeolus** et la mission **WIVERN**.

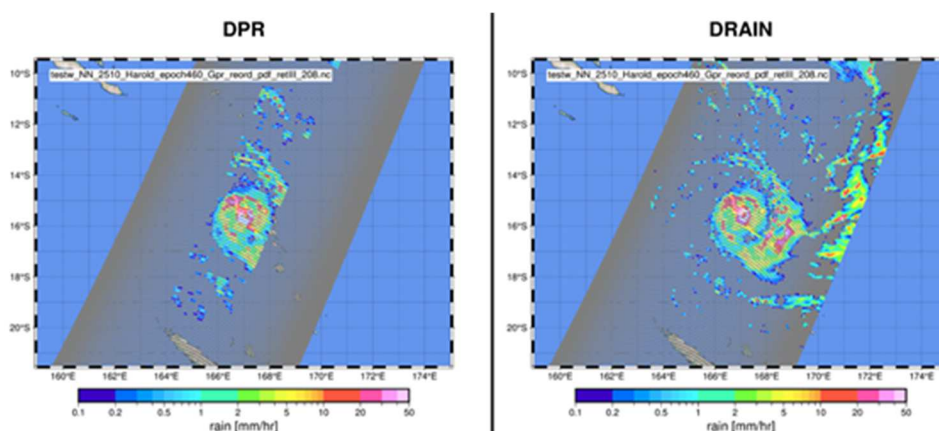


Fig. 4 : Exemple de restitution de la pluie instantanée pour le cyclone Harold, observé le 6 avril 2020. A gauche, l'image de référence de la pluie de surface du **Dual-frequency Precipitation Radar (DPR)** de **GPM-core**. A droite, la restitution proposée par IA (DRAIN) à partir du **GPM Microwave Imager (GMI)** présent sur la même plateforme. © LATMOS/IPSL

1.5. OBSERVATIONS AU SOL, SOUS BALLON OU AÉROPORTÉES

Ces moyens sont indispensables pour tester de nouveaux capteurs en vue de leur spatialisation, développer les chaînes de traitements associés, et valider les données spatiales durant des campagnes de mesures dédiées.

De nouvelles synergies impliquant des avions tant au niveau français qu'europpéen ont permis l'organisation de plusieurs campagnes de mesures dans le cadre de l'infrastructure de recherche européenne HEMERA (ballons) ou de validation de satellites (CADDIWA validation **AEOLUS**, MAGIC validation missions GES). Ainsi, les campagnes MAGIC ont fédéré des mesures ballons (Ballons Légers Dilatables BLD, Ballons Stratosphériques Ouverts BSO) avec des mesures sol (FTIR, Lidar) et aéroportées (avions SAFIRE/BAS/DLR, drones). La Fig. 5 montre également un exemple de synergie instrumentale entre des mesures au sol et des mesures ballons avec la détection du panache d'aérosols, issu de l'éruption du volcan Hunga-Tonga, à l'île de La Réunion par un lidar au sol et un compteur de particules (LOAC pour Light Optical Aerosols Counter) embarqué sous BLD.

Dans le domaine des ballons, le projet **STRATEOLE-2** consacré à la basse stratosphère tropicale, a fait l'objet de campagnes aux Seychelles (2022). Ces nouvelles données nourrissent des études sur la dynamique d'une couche de l'atmosphère peu documentée. On peut notamment citer la mise en évidence de certains modes de variabilité ondulatoires, de périodicité entre 2 et 5 jours, mal représentés actuellement dans les modèles de prévision numérique du temps (PNT).

Une innovation en cours porte sur des vols de ballons transcontinentaux et de longue durée, entre le site suédois de Kiruna et les côtes canadiennes. Le CNES a également soutenu le développement des Aéroclippers, ballons dérivants en contact avec la surface pour le suivi des cyclones (campagnes MICA).

Le CNES soutient les campagnes annuelles **MAGIC** préparant la validation des missions de mesures des GES. Ces campagnes sont aussi l'occasion d'embarquer au sein des avions SAFIRE, les démonstrateurs des futures missions satellites. On peut citer CHARM-F pour MERLIN, RALI pour **EarthCARE**, OSIRIS pour **3MI** ou FIRMOS pour **FORUM**.

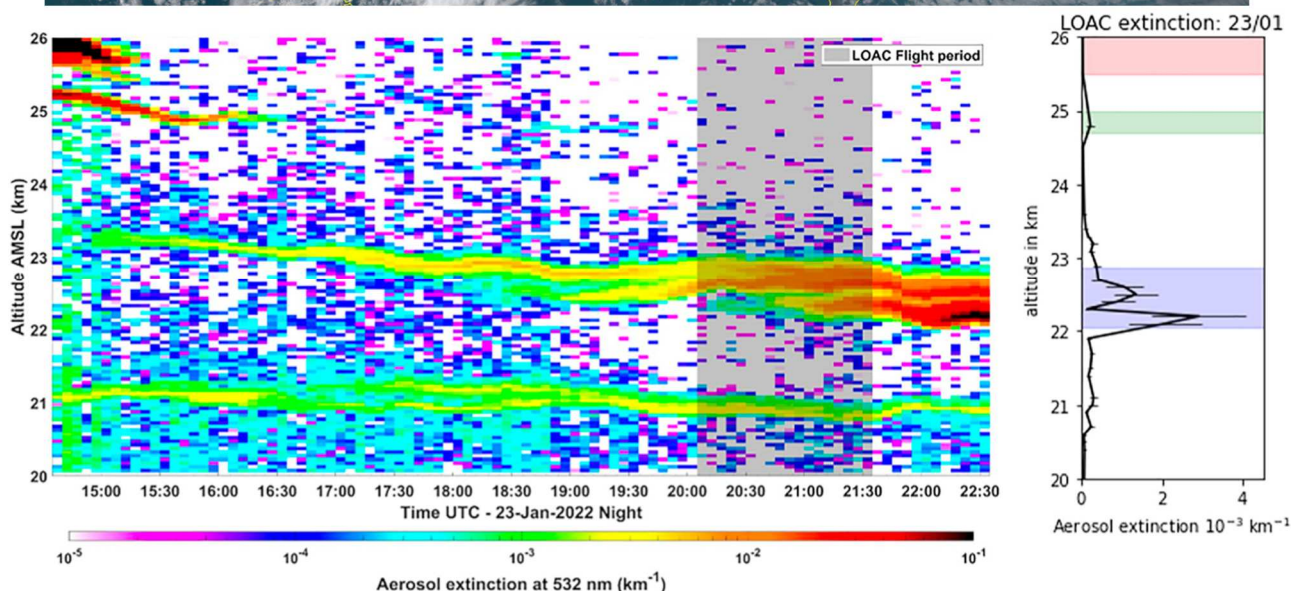
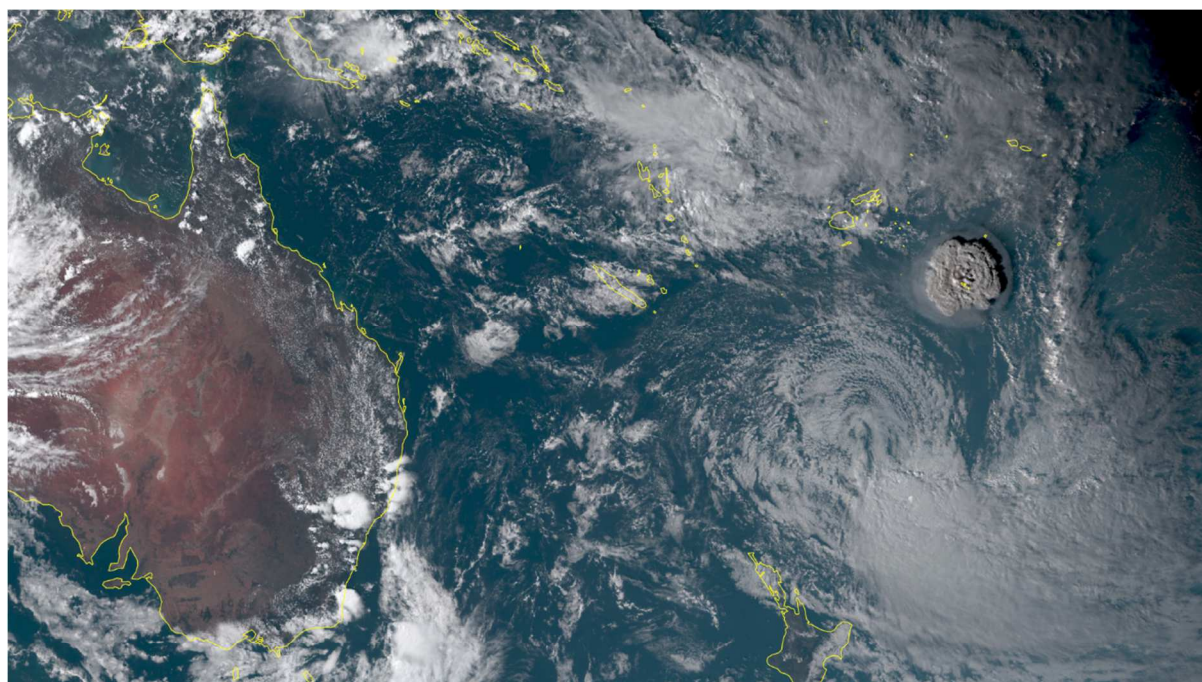


Fig. 5 : En haut, panache volcanique lors de l'éruption du volcan Hunga-Tonga le 14 janvier 2020 par le satellite HIMAWARI-8 (© Japan Aerospace Exploration Agency, Earth Observation Research Centre). En bas : panache observé 9 jours plus tard simultanément par le Lidar de l'observatoire de l'île de La Réunion au Maïdo (OPAR) et durant un vol BLD équipé du compteur d'aérosol LOAC. © Kloss et al., 2020

1.6. RETOUR SUR LES PRIORITÉS DU SPS DU HAVRE 2019

L'une des priorités fortes affichées en 2019 portait sur la spéciation des aérosols grâce à l'apport d'une voie UV sur un lidar américain de l'observatoire **AOS** (projet **MESCAL**). Cette perspective n'a pas abouti (arbitrage défavorable de la NASA). Des études ont malgré tout été menées et ont démontré l'intérêt de cette voie supplémentaire.

En revanche, il est important de souligner que deux autres priorités du SPS 2019 ont pu être engagées. Une priorité forte concernait les nuages avec la mission franco-israélienne **C3IEL** (CNES/ASI) et le projet **C2OMODO** (CNES) dans **AOS**. Après une pause pendant laquelle des travaux ont été poursuivis, **C3IEL** est reparti et devrait être mis en orbite en 2027. Quant à **C2OMODO**, le projet continue d'avancer avec un concept original de mission, assurant aux scientifiques français un accès à l'ensemble des données d'**AOS**.

Le prochain retrait de service du Falcon 20 de SAFIRE était connu en 2019 et les scientifiques avaient souligné l'importance de continuer à disposer d'un porteur capable de voler à haute altitude pour la préparation et la calibration/validation des futures missions spatiales. Le CNES et le CNRS ont réussi à sécuriser le budget très conséquent nécessaire à son remplacement qui devrait aboutir d'ici 2030.

Enfin, la perspective de lancement de plusieurs missions sur les GES telles que **MicroCarb**, **Merlin** et **CO2M** était aussi connue, et le besoin avait été souligné de se préparer à les exploiter et à les valider. La dynamique entretenue depuis 2018 autour du projet MAGIC, grâce à un important soutien du CNES, a permis de bien avancer sur cette thématique.

2. PRINCIPALES QUESTIONS, DÉFIS SCIENTIFIQUES ET SOCIÉTAUX

La communauté scientifique française souhaite poursuivre ses recherches sur la thématique atmosphère selon six axes décrits ci-dessous.

2.1. (A.1) COMMENT AFFINER NOTRE CONNAISSANCE DU CYCLE DES GAZ À EFFET DE SERRE GRÂCE AUX OBSERVATIONS SPATIALES ?

Ce premier axe concerne les GES, leur impact climatique ainsi que l'estimation de la part anthropique des émissions. Les questions sur lesquelles il est important de progresser afin d'affiner notre connaissance de ces cycles sont :

- Comment estimer les flux de CO₂ et du méthane via l'inversion atmosphérique ?
- Comment expliquer la variabilité interannuelle du contenu en méthane dans l'atmosphère ?
- Quel seuil de détection est-il nécessaire d'atteindre afin de mettre en évidence les points d'émission et raffiner ainsi les inventaires et la caractérisation des sources ?

Concernant l'estimation des flux des GES, nous devrions disposer en Europe à partir de 2025 de données inédites de concentration atmosphérique de CO₂ et de méthane avec les missions **MicroCarb**, **CO2M**, **Merlin**, **IASI-NG**, **Sentinel 5P** et **5**. Veiller à la qualité des mesures sera clé, notamment sur le respect des spécifications de leurs biais. L'objectif est de faire correspondre les flux estimés par l'approche descendante, basée sur l'inversion des mesures atmosphériques, avec les bilans de flux obtenus par l'ensemble des processus d'émission et d'absorption au sol au cours des saisons (cycle du carbone). La synergie avec des mesures connexes comme l'activité photosynthétique, l'humidité des sols, la température de surface sera une étape importante pour mieux comprendre les phénomènes sous-jacents à la variabilité atmosphérique des GES.

Pour le méthane, en plus des phénomènes de surface, il faut également évaluer sa variation interannuelle sous l'effet de réactions photochimiques, notamment dans la stratosphère. Ainsi, en plus de recueillir sa concentration proche de la surface, un des objectifs-clés vise à évaluer ses variations à plus haute altitude grâce à des capteurs tels que **IASI** ou **IASI-NG**, **MERLIN** et

éventuellement à visée au Limbe (**Altius, CAIRT**), et en les combinant avec des mesures connexes telles que les teneurs en ozone ou en vapeur d'eau.

Au-delà d'établir le bilan global des GES, un défi récurrent est de pouvoir déterminer les parts naturelle et anthropique des émissions. Ce besoin nécessite de pouvoir réaliser des mesures à haute résolution spatiale.

2.2. (A.2) COMMENT MIEUX CARACTÉRISER LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE ET SUIVRE LA QUALITÉ DE L'AIR ?

Le suivi de l'évolution des concentrations de divers polluants atmosphériques, sous forme gazeuse (O_3 , NO_x , COV) ou particulaires (aérosols) est un enjeu important pour notre climat et pour la qualité de l'air. Les travaux à venir permettront de répondre aux questions suivantes :

- Comment améliorer le suivi des principaux gaz polluants et particules qui modifient l'équilibre physico-chimique de l'atmosphère et dégradent la qualité de l'air en surface ?
- Quelle est la composition des panaches émis par les feux de biomasse et les volcans ? Comment évoluent-ils chimiquement lors du transport ?
- Quelles sont les tendances à long terme des composés atmosphériques dans la troposphère libre et la basse stratosphère, notamment en relation avec le changement climatique ?

Les mesures de nouvelle génération des missions **Sentinel 4** (spectro-imageur UV-Visible-NIR « UVN ») et du spectro-imageur **IRS** à bord de Meteosat Nouvelle Génération **MTG-S** et **Sentinel 5 (UVNS) – IASI-NG** et **3MI** à bord d'**EPS-SG A** ont un fort potentiel pour approfondir l'étude de l'évolution chimique des panaches d'aérosols et ses précurseurs gazeux (NO_2 , SO_2 , NH_3 , COV), avec une meilleure précision que les précédentes, du fait d'une résolution spectrale accrue et de couvertures spatiale et temporelle plus fines (échelle intra-ville et évolution diurne).

Les missions **Sentinel 4** et **5** embarqueront aussi plusieurs capteurs, permettant l'observation des polluants majeurs tels que l' O_3 , les PM (aérosols), le SO_2 , avec des résolutions verticales et une sensibilité proche de la surface accrues par rapport à la génération précédente. Ces missions apporteront également des mesures précieuses pour l'étude de la haute troposphère/basse stratosphère et dans cet objectif, la pérennité du programme Sentinel est précieuse car elle permet également d'étudier les tendances sur le long terme.

2.3. (A.3) COMMENT SE FORMENT ET SE DÉVELOPPENT LES NUAGES EN FONCTION DE LEUR ENVIRONNEMENT ?

La formation des nuages consiste en la condensation de la vapeur d'eau en petites gouttelettes d'eau liquide ou en petits cristaux de glace lorsque les conditions thermodynamiques y sont favorables. Cette formation fait l'objet du troisième axe de recherche, avec la volonté de répondre aux questions suivantes :

- Comment le mélange et les propriétés des aérosols anthropiques et naturels agissent-ils sur les processus de formation des nuages, leurs propriétés radiatives et les précipitations ?
- Comment améliorer notre compréhension de la convection profonde, processus clé pour notre climat ?
- Quels liens entre précipitations, activité électrique des orages et chimie atmosphérique ?

Les aérosols agissent comme des noyaux de condensation et jouent ainsi un rôle clé dans la microphysique des nuages (distribution en nombre et en taille des hydrométéores), et dans la fréquence et l'intensité des précipitations. La mission **EarthCARE** récemment mise en orbite ainsi que le projet de mission **CALIGOLA/AOS** permettront d'améliorer nos connaissances sur les propriétés des aérosols qui exercent une influence considérable sur le climat et le cycle de l'eau et qu'il est nécessaire de mieux documenter.

La convection profonde joue un rôle fondamental dans le fonctionnement du système climatique, via le transport d'eau et d'énergie ainsi que des espèces chimiques et aérosols, vers la troposphère libre. L'activité convective peut notamment être caractérisée par la vitesse verticale et les flux de masse. A ce jour, ces deux variables ne sont pas mesurées à l'échelle mondiale ce qui est un élément bloquant pour la modélisation de ces phénomènes. Ce manque devrait être comblé par les mesures des missions **C2OMODO/AOS**, **C3IEL** ainsi que les mesures du radar Doppler de la mission **WIVERN**.

En lien avec la convection, les éclairs sont le résultat du couplage entre phénomènes dynamiques et la présence d'eau sous forme glacée au sein de l'orage. Grâce à la dynamique autour des missions **C3IEL** et **MTG/LI**, la communauté française souhaite compléter ses recherches ayant trait à la physique même des phénomènes d'électrification vers la chimie des éclairs afin de mieux comprendre la production des oxydes d'azote (NOx).

2.4. (A.4) QUELLES INTERACTIONS ENTRE LES PROCESSUS ATMOSPHÉRIQUES DE GRANDES ET DE PETITES ÉCHELLES ?

Au niveau global, une bonne compréhension des modes de variabilité internes du système climatique est très importante, cependant les interactions entre processus à des échelles variées sont nombreuses et complexes. Ces questions d'interactions "multi-échelles" font l'objet du quatrième axe prioritaire avec les questions suivantes :

- Comment les phénomènes dynamiques de grandes et petites échelles influencent-ils le mélange des aérosols, la convection et la circulation atmosphérique globale ?
- Comment améliorer la modélisation de ces couplages entre grandes et petites échelles pour l'étude du climat ?

Une zone de l'atmosphère particulièrement concernée par ces interactions multi-échelles est la haute troposphère et la basse stratosphère tropicale. C'est notamment proche de cette interface qu'a lieu l'oscillation quasi biennale (QBO). Phénomène dynamique de grande échelle, cette oscillation influence à un niveau encore mal compris le transport et le mélange des aérosols, la convection et la circulation atmosphérique globale. Une meilleure documentation des processus dynamiques de petite échelle responsables de ce phénomène pourrait conduire à une modélisation améliorée de la circulation générale et permettre de réduire les incertitudes sur les projections climatiques.

2.5. (A.5) COMMENT MIEUX OBSERVER L'ATMOSPHÈRE POUR AMÉLIORER LA PRÉVISION MÉTÉOROLOGIQUE ?

La Prévision Numérique du Temps (PNT) est en pleine ébullition depuis quelques années avec, à la fois, l'émergence des jumeaux numériques à haute résolution (kilométrique à l'échelle globale, et quelques centaines de mètres à l'échelle régionale) et la prévision par inférence basée sur l'IA. Ainsi, le cinquième axe de recherches concerne les questions suivantes :

- Quels sont les processus atmosphériques nécessitant une contrainte observationnelle à fine échelle ?
- Comment compléter les observations des instruments spatiaux de référence grâce à des constellations d'instruments miniaturisés ?

S'il paraît illusoire de penser pouvoir contraindre tous les degrés de liberté de ces modèles à haute résolution grâce à des observations, il convient d'identifier les processus clés qui nécessitent une contrainte forte à haute résolution, afin que ces modèles de nouvelle génération produisent des prévisions à leur plein potentiel. Le projet de constellation de petits satellites **EPS-Sterna** permettra d'augmenter de manière significative la revisite des observations en température et humidité dans la troposphère et la stratosphère. En complément, la constellation **CMIM** pourrait s'avérer clé pour l'observation dans les basses couches de l'atmosphère caractérisées par une forte variabilité.

2.6. (A.6) COMMENT ÉVOLUE LE BILAN RADIATIF DE NOTRE PLANÈTE DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

Enfin, le sixième et dernier axe de recherches concerne le bilan radiatif de notre planète. L'étude de son évolution intègre les effets combinés de l'évolution des concentrations de GES dans notre atmosphère mais également les différents effets de rétroactions avec les nuages et les aérosols. Ces recherches visent à répondre aux questions suivantes :

- Quel est l'impact des nuages, des aérosols et des gaz sur le bilan radiatif de notre planète ?
- Comment mesurer suffisamment précisément le déséquilibre énergétique radiatif de la Terre pour fournir un indicateur supplémentaire de l'efficacité des politiques environnementales ?

Des éléments de réponse pourront être apportés à ces questions, en particulier si les outils de transfert radiatif nécessaires à ces recherches continuent à être développés et soutenus sur le temps long. Avec les nouvelles missions à venir (exemple : **IASI-NG / EPS-SG, FORUM, ICI**), le besoin de mieux documenter les interactions entre rayonnement et molécules/particules devrait se renforcer.

Les observations de la mission **EarthCARE** et du projet de mission **CALIGOLA/AOS** permettront de mieux quantifier l'effet radiatif direct des aérosols. Les efforts de validation d'EarthCARE qui seront menés dans les années à venir sont en ce sens essentiels.

Concernant la mesure du déséquilibre énergétique radiatif de la Terre (EEI pour Earth Energy Imbalance), les missions successives **CERES** de la NASA, et **ScaRaB** du CNES, permettent depuis une vingtaine d'années de surveiller l'évolution de l'EEI par radiométrie bandes larges. Néanmoins l'estimation de l'EEI est encore entâchée de fortes incertitudes, et la capacité du prochain système post-CERES n'est pas encore établie. La mission **ECO**, permettra d'atteindre une mesure de l'EEI très précise avec un concept innovant de constellation.

3. RECOMMANDATIONS

3.1. LES MISSIONS AVEC UN CADRE CNES

Mission suborbitale de priorité majeure (question A4) : StratoFleet

La documentation des couplages entre phénomènes d'échelles variées, en particulier le mélange des aérosols, la convection et la circulation atmosphérique globale, nécessite à la fois des observations globales depuis l'espace, mais aussi des observations locales pour documenter les processus. En ce sens, les ballons stratosphériques pressurisés sont un outil d'observation complémentaire aux observations spatiales, privilégié pour effectuer des mesures in situ et de télédétection. La communauté souhaite pouvoir exploiter de nouvelles capacités d'observations par ballons stratosphériques pressurisés : (i) une durée de vie accrue (6 mois à 1 an) des ballons permettrait d'observer un cycle d'oscillation complet de la QBO, (ii) différents niveaux de pilotabilité de ces ballons permettraient de satisfaire différentes stratégies d'observation dans la zone géographique d'intérêt. Il est proposé d'amorcer un nouveau programme ballon, **StratoFleet**, s'appuyant sur l'héritage du programme **Stratéole**, pour fournir de nouvelles observations de la QBO sur une période d'oscillation complète. En complément, des observations des interactions entre nuages, aérosols et convection, sur plusieurs zones géographiques telles que l'Afrique tropicale et l'Arctique seraient pertinentes et bénéficieraient des avancées instrumentales réalisées pour le programme **StratoFleet**. Un cadre international intéressant pour soutenir ces travaux serait le programme suborbital **AOS**.

Mission de priorité majeure (question A5) : CMIM

Afin de répondre aux besoins des futurs modèles de PNT (kilométrique à l'échelle globale, sub-kilométrique à l'échelle régionale), l'observation des processus dans les basses couches de l'atmosphère, et en particulier du champ d'humidité, est nécessaire. La fréquence d'observation de ces champs est aujourd'hui limitée à environ 6h avec les satellites **MetOp** et **NOAA**. L'objectif est de descendre en dessous de 3 heures grâce à une constellation complémentaire de petits satellites. La Phase 0 **CMIM** (Constellation de Mlni sondeurs pour la Météorologie) a permis d'explorer des synergies entre sondeurs hyperspectraux dans l'infrarouge et sondeurs micro-ondes répondant au besoin d'observation dans les basses couches de l'atmosphère. A partir des résultats de cette Phase 0, il est recommandé de construire une proposition de systèmes d'observation (au niveau instrument et au niveau architecture de constellation), pour une potentielle implémentation future dans la programmation d'EUMETSAT sur le modèle de la constellation **EPS-Sterna**.

Mission de priorité majeure (question A3) : C2OMODO / AOS

La dynamique interne de la convection profonde est encore mal documentée à l'échelle globale, en particulier le flux de masse convectif, avec très peu de références observationnelles. Ce thème avait été soulevé lors de la prospective 2019, et la communauté souhaite indiquer à nouveau le caractère prioritaire du projet de tandem de radiomètres microondes passifs **C2OMODO** au sein de l'observatoire international **AOS**. Ses observations auront une sensibilité accrue à l'eau sous sa forme condensée, avec des fréquences allant de 89 GHz à 325 GHz, et une résolution spatiale entre 10 km et 3 km. L'exploitation de la différence temporelle des mesures du tandem de radiomètres permettra d'inférer des informations nouvelles sur la dynamique interne de la convection.

3.2. LES MISSIONS AVEC UN CADRE ESA ET AUTRES

Mission de priorité majeure : CALIGOLA / AOS

L'observation de la spéciation des aérosols à l'échelle du globe en fonction de l'altitude serait une nécessité pour caractériser les impacts des aérosols sur la composition de l'atmosphère, depuis la surface jusqu'à la haute troposphère / basse stratosphère et le bilan radiatif dans la haute troposphère / basse stratosphère. Un enjeu important est la meilleure caractérisation de l'impact des événements extrêmes et notamment des mégafeux, et des éruptions volcaniques. Malheureusement la mission **MESCAL**, proposée comme priorité majeure en 2019, n'a pas été sélectionnée par la NASA. Un concept proche, la mission **VULCAIN**, a par la suite été proposé mais non retenu au programme Earth Explorer 12. Actuellement en Phase A, le lidar **CALIGOLA** proposé par l'ASI comme contribution à **AOS** pourrait présenter des caractéristiques intéressantes pour la spéciation des aérosols et il sera important que la communauté française soit en bonne position pour exploiter ces données bien qu'aucune contribution instrumentale française ne soit envisagée.

Mission de priorité substantielle: WIVERN

La mission **WIVERN** est actuellement en Phase A compétitive du programme Earth Explorer 11 de l'ESA. Cette mission fournira des observations des vents au cœur des nuages à 1 km de résolution grâce à son radar Doppler avec une fauchée de 800 km. Ses observations seront très complémentaires de celles de la mission **C2OMODO**, afin de mieux caractériser le transport d'eau sous forme condensée par les processus dynamiques de fine échelle. De plus, les observations de vents de **WIVERN** offriront une couverture géographique complémentaire aux observations en ciel clair d'**EPS-Aeolus**, au bénéfice de la prévision numérique du temps. Il paraît prioritaire de soutenir cette mission dans son processus de sélection et d'accompagner les études scientifiques dédiées.

Mission de priorité substantielle: ECO

L'innovation des technologies et possiblement des designs instrumentaux en radiométrie depuis 20 ans n'a pour l'instant pas ruisselé vers la mesure de l'EEI (Earth Energy Imbalance, paramètre fondamental nécessitant une mesure précise). La mission **ECO** qui propose de mesurer l'EEI de

manière innovante et précise est actuellement en Phase 0 compétitive du programme Earth Explorer 12 et il paraît prioritaire de la soutenir dans son processus de sélection et d'accompagner les études scientifiques dédiées.

3.3. LES CAMPAGNES DE MESURES

Priorité substantielle: AOS suborbital

En complément des observations spatiales, l'étude de processus physiques et chimiques liés à l'évolution et la formation des aérosols bénéficiera de moyens additionnels de mesure. Il est proposé de développer un volet dédié aux mesures in situ pouvant fournir une spéciation chimique détaillée des aérosols et des gaz précurseurs, embarqués sous ballon, aéroportées ou sur un site depuis le sol, au sein du programme suborbital **AOS**. Ces mesures de terrain permettront d'étudier le lien entre les propriétés optiques et la composition des aérosols, informations essentielles pour le développement de produits satellitaires aérosols fiables et leur validation.

Priorité substantielle: IASI-NG, Sentinel-5P suborbital, MAGIC

La compréhension du cycle des GES au niveau global passe notamment par la documentation des flux dans les zones géographiques où les puits et sources sont peu connus. La communauté scientifique française souhaite soutenir le programme MAGIC et les campagnes de mesures proposées dans les années à venir dans les tropiques et les hautes latitudes. Celles-ci permettront de documenter la variabilité des GES et valider les missions spatiales avec des mesures au sol ou aéroportées coordonnées avec le passage des satellites, dans ces zones géographiques dépourvues de référence observationnelle.

3.4. LES R&T

R&T de priorité majeure: lidars

Un besoin important en R&T se dégage autour des technologies lidars pour différentes applications (ex : spéciation des aérosols, mesures de GES) afin que ce type d'instrumentation puisse être proposé dans divers cadres programmatiques de manière plus aisée. Concernant la mesure des GES, et par rapport aux instruments passifs dans le proche infrarouge, les lidars réduisent les inconvénients de la mesure des concentrations en présence de diffusion par les aérosols (nouveau concept de lidar basé sur des peignes de fréquences). Il paraît prioritaire de poursuivre les actions de R&T autour de cette technologie, ainsi que de définir avec la communauté scientifique quelles variables géophysiques seraient le plus pertinent à mesurer avec un lidar spatial, en complément des missions spatiales à venir.

R&T de priorité majeure : Concepts agiles haute résolution

En plus de la différenciation des flux anthropiques et naturels de GES, il est désormais question de quantification des émissions anthropiques de GES et si possible d'attribution. Pour cela le recours à des missions à très haute résolution spatiale (quelques centaines de mètres) telles que le permettent les capteurs hyperspectraux, semble incontournable. En réponse à ces nouveaux défis, l'amélioration des détecteurs dans le proche infra-rouge et de l'agilité des plateformes ainsi que la miniaturisation pour des perspectives de constellations, sont des pistes à investiguer en R&T dans les prochaines années.

3.5. AUTRES RECOMMANDATIONS

New Space et recherches scientifiques

De nouveaux acteurs du secteur privé se positionnent actuellement comme futurs producteurs de données pour l'observation de l'atmosphère et visent à proposer des services dans les domaines de la surveillance du climat et de la qualité de l'air. Les données envisagées sont souvent identifiées comme complémentaires des missions pilotées par les agences spatiales. Cependant les politiques de partage des données mises en œuvre devront les rendre facilement accessibles pour la

recherche. La qualité des mesures qui seront produites est également un point capital pour leur réelle utilisation, les efforts de calibration/validation sont ainsi essentiels.

Mesures avions, ballons, et IN AIR

Les nombreux besoins en mesures par avions et ballons émis par la communauté Atmosphère reflètent l'importance de la nouvelle Infrastructure IN AIR pour celle-ci. De plus, de nombreux projets spatiaux auront besoin de ces moyens aéroportés pour leur validation dans les prochaines années (**MicroCarb, IASI-NG, C3IEL, AOS...**). Ainsi, il paraît prioritaire de maintenir une flotte française d'avions instrumentés pour la recherche ainsi que des moyens ballons répondant aux besoins de la communauté scientifique. Il est recommandé en particulier aux tutelles de SAFIRE de préparer dès maintenant le renouvellement de l'avion ATR pour éviter, comme c'est le cas du jet, une béance de plusieurs années dans les vecteurs disponibles.

	Questions scientifiques	Observable	Cadre actuel de développement	Priorité	Recommandation
MISSIONS CADRE CNES	A.4	Multi variables	StratoFleet (Héritage Stratéole)	Majeure	Nouveau programme ballons
	A.3	Flux de masse	C2OMODO / AOS (Phase B0)	Majeure	Engagement programme AOS (Phases BCDE1) incluant le tandem de radiomètres CNES
MISSIONS CADRES ESA et AUTRES	A.5	Température, Humidité	CMIM (Phase 0 CNES)	Majeure	Passage en Phase A et recherche d'un cadre programmatique EUMETSAT
	A.2, A.3, A.6	Spéciation des aérosols	CALIGOLA / AOS	Majeure	Accompagnement mission ASI/NASA
	A.3	Vents	WIVERN	Substantielle	Accompagnement mission ESA
	A.6	Earth Energy Imbalance	ECO	Substantielle	Accompagnement mission ESA
CAMPAGNES DE MESURES	A.2, A.3, A.6	Multi variables	AOS suborbital	Substantielle	Engagement d'un programme suborbital CNES AOS
	A.1, A.2	Multi variables	IASI-NG et Sentinel-5P suborbital, MAGIC	Substantielle	Soutien aux activités de validation via campagnes de mesures dans les tropiques et les hautes latitudes