

GROUPE THEMATIQUE ATMOSPHERE

Philippe Chambon (Président entrant), Frédéric Chevallier, Juan Cuesta, Alain Dabas (Président sortant), Carole Deniel (Responsable de thème Composition de l'Atmosphère), Adrien Deschamps (Responsable de thème Météorologie et Dynamique de l'Atmosphère), Fabrice Jegou, Lilian Joly, Laurent Labonnote, Cécile Mallet, Nathalie Philippon, Fred Szczap, Solène Turquéty.

Table des matières

1. Introduction	2
2. Bilan et avancées depuis la prospective de 2019.....	3
2.1. Aérosols, gaz réactifs et qualité de l'air	3
2.2. Nuages, convection et précipitations.....	4
2.3. Forçages radiatifs et gaz à effet de serre	6
2.4. travaux d'accompagnement et préparatoire des missions actuelles ou prévues	9
2.5. Observations au sol, sous ballon ou aéroportées.....	12
3. Références	16

1. INTRODUCTION

Dans la suite de Copernicus, l'essor du Newspace ou d'un besoin à visée commercial/applicatif pour des services environnementaux a fini par arriver en Europe et a entraîné une programmation spatiale connexe pour certains paramètres, en particulier le suivi de la pollution atmosphérique par les particules fines, la prévision des pluies intenses brèves ou la caractérisation des émissions de méthane au-dessus des installations industrielles. Poussé par ceux qu'on appelle "les nouveaux entrants", ce courant repose souvent sur l'expertise et l'héritage des laboratoires de recherche qui, s'ils sont souvent associés, ne sont pas prescripteurs. Il concerne aussi bien la définition, le développement et les opérations de futures constellations (GRASP, Absolute, Predict...) que la mise en œuvre de nouvelles méthodologies d'utilisations de la donnée souvent basées sur l'IA (Kayrros, Prométhée, Disaitek, Absolute Sensing).

On pourra aussi relever l'accélération du nombre de données disponibles ou à venir pour la communauté avec l'avènement de Copernicus, ou le programme d'Eumetsat qui oblige probablement les acteurs à se concentrer sur le traitement, la modélisation et l'exploitation plus que sur la définition de nouveaux besoins. Il est probable que nous arrivons à un nouveau stade en matière de recherche spatiale en environnement qui redirige les compétences vers de nouvelles expertises comme l'Intelligence Artificielle (IA) qui tire justement sa force de sa capacité à traiter d'énormes quantités de données et peut réaliser rapidement et de façon automatisée des traitements complexes. Ce mouvement est d'autant plus important que les outils d'analyse sont eux aussi confrontés à la révolution technologique de l'IA (développement d'émulateurs au coût numérique de plusieurs ordres de grandeur inférieur). La chaîne entière de production est donc concernée par la révolution technologique. Elle passera par un effort continu de mise à disposition des données selon des formats et des méthodes simples et efficaces que le pôle de données AERIS, maintenant largement utilisé par la communauté, anticipe.

Le changement climatique induit un besoin d'observation sur le temps long (plusieurs dizaines d'années). Pour l'assurer, il faut maintenir des filières, avec des instruments qui peuvent évoluer vers plus de précision, de résolution, mais qui s'inscrit dans une certaine continuité technologique. Les moyens consacrés au maintien de ces filières entrent en compétition avec ceux nécessaires au développement de nouveaux capteurs embarqués permettant d'accéder à de nouvelles observables. Ce dilemme est très présent dans le programme Copernicus. Il faudra garder à l'avenir un équilibre entre innovation et continuité d'observation, en s'appuyant sur les services opérationnels (services météorologiques, applications dans le cadre du SCO...) qui peuvent justifier et valoriser les efforts consentis.

2. BILAN ET AVANCEES DEPUIS LA PROSPECTIVE DE 2019

2.1. AEROSOLS, GAZ REACTIFS ET QUALITE DE L'AIR

La pollution atmosphérique est une menace externe majeure pour la santé humaine. Les principaux polluants de l'air sont les aérosols et l'ozone troposphérique. En plus des émissions directes des particules, des précurseurs gazeux, tels que les oxydes d'azote et de soufre, l'ammoniac, le monoxyde de carbone et les composés organiques volatiles contribuent fortement à la production des polluants majeurs dans l'atmosphère. Bien que des moyens d'observation et de modélisation de ces polluants existent, il reste de nombreuses inconnues sur les processus chimiques et physiques les affectant, sur leur redistribution verticale dans l'atmosphère et sur leurs impacts sur l'environnement.

L'observation spatiale des polluants atmosphériques a fortement progressé ces dernières années grâce à l'utilisation innovante des mesures de missions existantes telles que MetOp avec IASI et PARASOL avec POLDER et des nouvelles missions comme Sentinel 5-Precursor avec TROPOMI, via une forte implication de la communauté française.

L'analyse des observations IASI des concentrations d'ammoniac dans l'atmosphère a permis de caractériser davantage les émissions de ce polluant aux échelles locales et régionales, et leur cycle hebdomadaire, ainsi que d'étudier le lien avec la formation des aérosols d'ammonium. La relation avec la température de surface a permis de détecter l'application des engrais en zones agricoles, dont l'évaporation est une source majeure d'ammoniac. De même, une approche nouvelle utilisant les spectres de radiance mesurés par IASI a permis la quantification de l'abondance en sulfate d'ammonium lors d'un événement de pollution aux particules fines en Europe pour la première fois depuis l'espace. Par ailleurs, l'inversion des émissions d'autres gaz précurseurs tels que le dioxyde d'azote en Chine et en Europe a permis d'améliorer leurs quantifications grâce aux mesures des missions OMI et TROPOMI, les dernières d'une résolution spatiale sans précédent de $3,5 \times 5,5 \text{ km}^2$.

La communauté scientifique française est aussi activement impliquée dans la phase II du consortium international sur le *Tropospheric Ozone Assessment Report* (TOAR) pour l'étude des tendances, variabilités et impacts environnementaux de l'ozone troposphérique. Cette contribution est effectuée via quatre produits satellitaires français sur l'ozone, trois utilisant des observations infrarouge IASI et un multi-spectral les combinant avec celles de GOME-2 dans l'ultraviolet. Ces dernières se caractérisent par une sensibilité particulièrement accrue à l'ozone à proximité de la surface, ayant par exemple permis de quantifier l'effet du confinement lié au COVID-19 sur la pollution à l'ozone en Europe depuis l'espace de manière inédite.

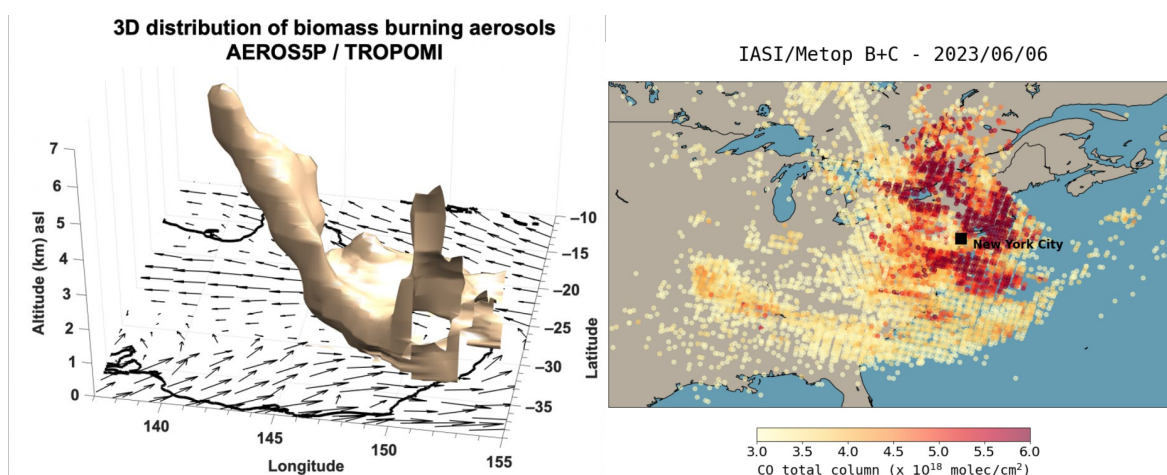


Fig. 1 : (gauche) Cartographie tridimensionnelle des panaches de feux de forêt australiens et leur injection dans l'atmosphère à l'échelle journalière, observée pour la première fois par le capteur satellitaire TROPOMI. Crédit Juan Cuesta (LISA/IPSL), Lemmouchi et al., 2022. (droite) Concentration en 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)

La pollution atmosphérique résultant des feux, composée de nombreux gaz traces et aérosols, altère fortement la qualité de l'air régionale et parfois sur de très longues distances. Des avancées significatives sur la caractérisation de l'impact des feux de biomasse sur la composition atmosphérique ont été effectuées à partir des mesures IASI, TROPOMI, CALIOP et des capteurs géostationnaires. L'injection des panaches de fumées a été observée pour la première fois en 3D grâce à une approche innovante utilisant les mesures de TROPOMI dans le visible et la bande A de l'oxygène (voir Fig. 1). Lors des événements extrêmes de feux, les émissions et le transport à longues distances des multiples gaz précurseurs, tels que l'acide nitreux ont été documentés grâce aux observations d'IASI, et un suivi du transport transcontinental des fumées a été effectué par synergie des mesures géostationnaires. Les mesures de monoxyde de carbone issues d'IASI ont permis de quantifier la magnitude et de suivre transport des fumées canadiennes durant l'été 2023, qui ont fortement dégradé la qualité de l'air de la ville de New York.

2.2. NUAGES, CONVECTION ET PRECIPITATIONS

Les nuages, et plus généralement l'eau condensée, jouent un rôle fondamental dans le système climatique via les échanges énergétiques et hydriques qui s'y opèrent. Mieux caractériser leur impact radiatif, leurs rétroactions, leurs liens avec l'environnement et leurs conséquences sur les populations est de ce fait un enjeu majeur. Se donner les moyens d'atteindre ces objectifs passe par (1) l'observation des propriétés nuageuses, des précipitations et leurs évolutions, (2) la compréhension de l'influence des conditions environnementales sur les processus nuageux et (3) la caractérisation des mécanismes qui conduisent aux événements météorologiques extrêmes.

L'exploitation des nouvelles possibilités offertes par Metop-SG (programmée pour 2025) et notamment des instruments micro-ondes tels que MWI et ICI, la mission EarthCare via la synergie Lidar/radar, devrait combler les manques dans l'observation des profils d'eau condensée. Différentes études ont ainsi été menées autour de ces observations par la communauté française. Des études préparatoires ont également démontré l'apport de la synergie entre les instruments infrarouges de MTG et micro-ondes de Metop-SG pour une meilleure représentation des précipitations et des nuages dans les modèles via l'assimilation.

La communauté française est activement impliquée dans le développement de produits innovants qui permettent de mieux comprendre les processus nuageux et d'introduire de nouvelles contraintes aux schémas microphysiques des modèles météorologiques et climatiques. Un exemple notable concerne la restitution de la distribution verticale de concentration en hydrométéores (N_i) dans les nuages en exploitant la synergie lidar-radar. Ce produit récent a permis d'offrir une première contrainte observationnelle sur la distribution globale de N_i (Fig. 2) et d'établir un lien entre les mesures in-situ et les prévisions des modèles. Ce type de produit est nécessaire pour mieux quantifier les processus de formation des nuages ainsi que leurs effets radiatifs globaux.

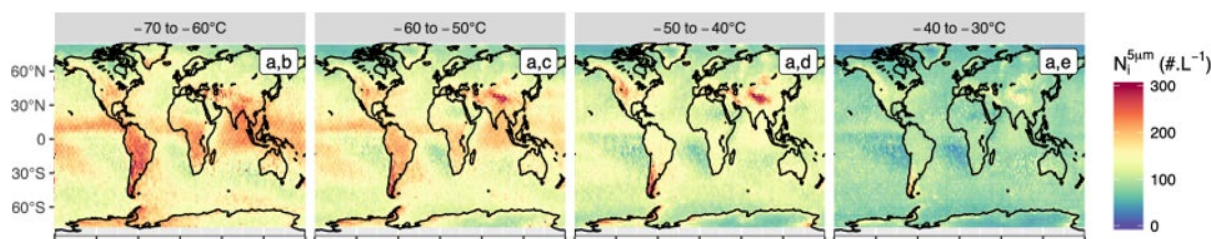


Fig. 2 : Distribution spatiale de concentration en hydrométéores (N_i) moyennée sur une grille de 2x20 entre 2006 et 2016. Les plages de température correspondent à des altitudes différentes (crédit Sourdeval et al. 2018).

Le transport de l'eau au sein des nuages, et notamment de la convection, qui restait encore très peu observé devrait bénéficier des missions C3IEL (actuellement en phase B) et C2OMODO (dans le cadre AOS), qui avaient été mises en avant lors du dernier SPS. Après une phase A passée avec succès, C3IEL avait été placée en hibernation puis relancée début 2023, avec entre-temps, la

poursuite de travaux sur les méthodes d'exploitation des données (restitution stéréoscopique de enveloppes des nuages). Concernant C2OMODO, un exemple de produit attendu est illustré sur la Fig. 3. Y sont comparées la restitution des flux de masse intégrés verticalement déduits de mesures synthétiques, au flux simulés par le modèle de recherche communautaire Meso-NH (figure de droite).

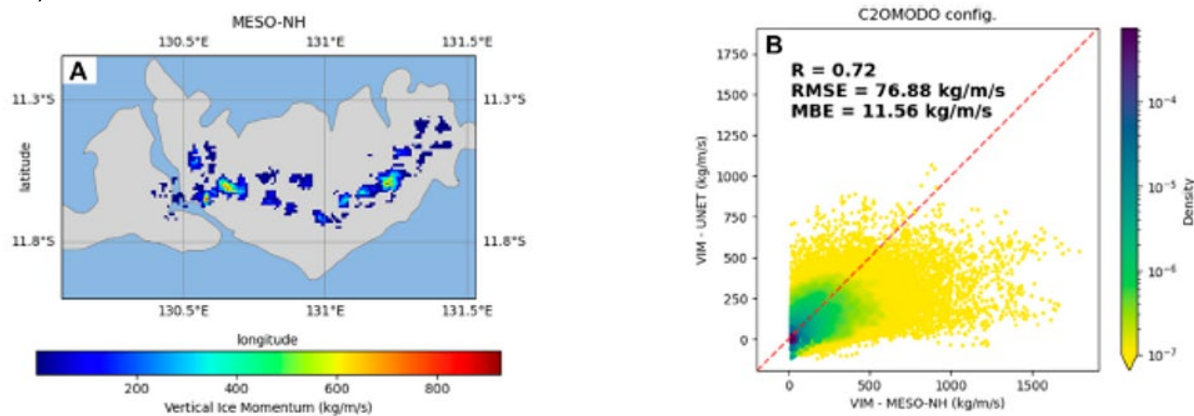


Fig. 3 : Flux de masse intégré verticalement (VIM) tel qu'il serait retrouvé par l'algorithme de restitution de C2OMODO comparé à celui donné par Meso-NH (à droite), et structure du système convectif vu à travers le VIM simulé par Meso-NH (à gauche) (crédit Brogniez et al. 2022)

Dans la même veine, AEOLUS a démontré sa capacité à améliorer notre connaissance du champ de vent, notamment sous les Tropiques et dans la basse stratosphère avec un impact très important sur la qualité des prévisions de vent des modèles globaux dont celui de Météo-France (via l'assimilation), motivant EUMETSAT à proposer à ses états membres une suite opérationnelle (programme EPS-Aeolus) à l'horizon 2030.

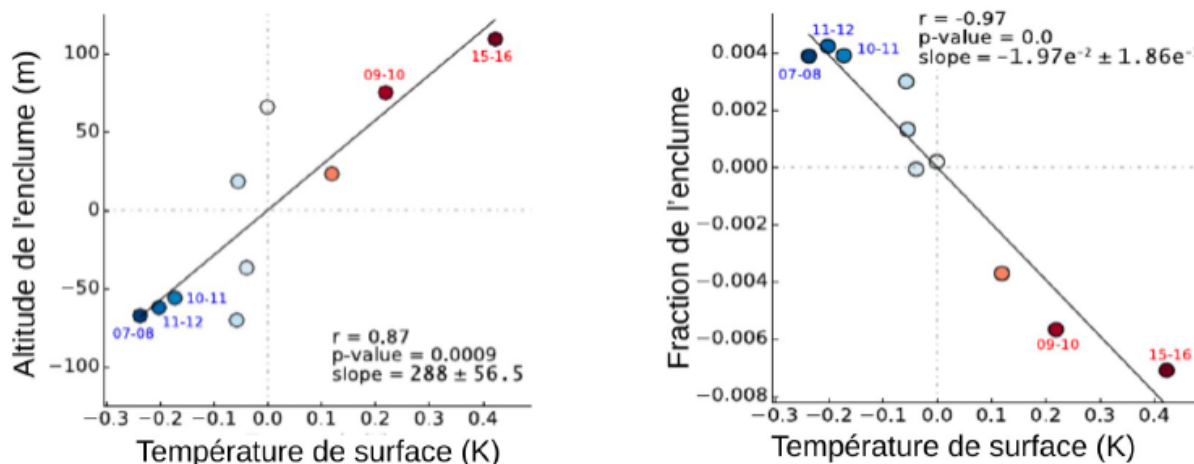


Fig. 4 : Évolution de l'altitude des enclumes (à gauche) et de leur fraction (à droite) en fonction de l'accroissement de température de surface aux échelles de temps inter-annuelles en utilisant les observations du Lidar Calipso/CALIPSO. Les valeurs sont des moyennes tropicales (30S-30N) annuelles (juillet à juin). Crédit Sanit-Lu et al. 2020.

On peut souligner également la contribution d'équipes Françaises à la Phase 0 de la mission ESA WIVERN, retenue en Phase A dans la cadre du programme Earth-Explorer EE11. Des études d'impact menées à Météo-France montre une très bonne complémentarité de ses observations avec AEOLUS et même EPS-Aeolus, la complémentarité provenant des zones observées (nuageuses pluvieuses pour WIVERN et principalement ciel clair pour AEOLUS).

Suite à la sélection de l'instrument FORUM dans le cadre de EE9 une communauté autour de « l'IR lointain » s'est formée en France qui a initié un certain nombre de travaux fondamentaux, en collaboration avec le synchrotron SOLEIL. L'un d'eux porte par exemple sur la détermination de

la dépendance en température de l'indice spectral de la glace dans l'IR lointain, quantité fondamentale pour une évaluation précise du bilan radiatif des nuages de glace dans l'IR.

La détection de tendances climatiques, primordiale pour comprendre notre climat futur, nécessite l'acquisition de longues séries temporelles. Si la communauté scientifique en a bien conscience, il est important de convaincre les décideurs/financeurs. Par exemple, grâce à la longévité du Lidar Caliop sur CALIPSO, on a pu mettre en évidence un effet dit de « stabilité », encore appelé effet d'Iris, prédit par des considérations théoriques par une équipe française. Cet effet consiste en la rétractation de la surface des nuages d'enclumes lors d'un réchauffement local (Fig. 4). L'impact de cet effet sur la température de la planète est encore incertain, et pourrait également influencer la circulation de Hadley-Walker et donc l'étendue des pluies tropicales.

Le lancement de EarthCare (printemps 2024), assurera une certaine continuité avec la mission CALIPSO (débutée en 2006), et permettra ainsi d'intensifier les recherches sur la détection de tendances. Il faudra surmonter la difficulté liée à la longueur d'onde d'EarthCare (UV) différente de celles de CALIPSO (vert et proche IR). Cette difficulté a commencé à être relevée grâce à AEOLUS (émettant lui aussi dans l'UV, et ayant fonctionné en même temps que CALIPSO).

Le lien entre propriétés nuageuses et l'environnement, et les processus qui influencent ces propriétés, nécessite d'observer à la fois la vapeur d'eau, la dynamique atmosphérique, les flux de surface et la variabilité physico-chimique des aérosols rendant cette question plus difficile à aborder. Cependant la combinaison d'observations in-situ obtenues lors de campagnes de mesures ciblées (telle que EUREC4A par exemple), spatiales et les simulations méso-échelles ont permis par exemple de mieux comprendre les processus d'organisation nuageuse et d'améliorer leur représentation dans les modèles à différentes échelles.

La participation d'équipes françaises aux groupes de recherches internationaux sur ces thématiques tels que le « World Climate Research Program » ou le « Cloud Feedback Model Intercomparison Project » ainsi qu'au 6ième rapport du GIEC souligne le dynamisme des équipes françaises sur cette thématique.

De plus, les instruments IASI-NG et IRS (sur MTG lancé fin 2022) devraient contribuer à une meilleure représentation des champs de vapeur d'eau depuis l'espace. De même les instruments 3MI et MetImage (sur MetOP-SG) permettront de mieux caractériser le type d'aérosols dans l'environnement nuageux, et ainsi d'étendre ces études à une échelle globale.

Enfin, l'étude des événements extrêmes a bénéficié du lancement récent de deux imageurs d'éclairs l'un européen LI (sur MTG) et l'autre Américain GLM (sur GOES-R) en orbite géostationnaire. L'assimilation de ces mesures a par exemple montré qu'il était possible d'exploiter ces données afin d'améliorer la prévision d'évènements météorologiques à fort impact.

Les outils de modélisation du signal de diffusion de l'éclair dans le nuage ont également acquis une maturité suffisante (prenant en compte l'aspect tridimensionnelle du milieu ainsi qu'une composition réaliste d'hydrométéores) débouchant sur une simulation précise du signal mesuré aussi bien pour les instruments depuis le sol, embarqués sur un avion, qu'en orbite terrestre. Le travail s'oriente maintenant vers le développement de méthodes inverses qui permettent, grâce à l'information contenue dans les mesures, de caractériser les variables décrivant l'éclair et/ou le nuage.

2.3. FORÇAGES RADIATIFS ET GAZ A EFFET DE SERRE

Il s'agit ici de mieux comprendre les flux des espèces chimiques absorbantes dont les gaz à effet de serre, les interactions entre aérosols et le cycle de vie des nuages et leurs propriétés radiatives. Ces études sont beaucoup structurées en France par la préparation des missions MicroCarb, CO2M, MERLIN et GeoCARB pour le CO₂ et le CH₄ et Sentinel 5 (pour H₂O et O₃ dans la stratosphère), FORUM (IR lointain) et MESCAL (spéciation des aérosols par lidar multi-spectral). La capacité d'imagerie du CH₄ apportée par la mission TROPOMI/S5P, déjà opérationnelle, stimule aussi considérablement le domaine. En pratique, ces études améliorent les systèmes de modélisation atmosphérique directe et inverse (développement et exploitation), la connaissance des propriétés spectroscopiques des aérosols et des gaz et la fidélité des codes de transfert radiatif (ex., le passage à la modélisation 3D). La préparation des outils d'étalonnage/validation, notamment en

utilisant des mesures issues de réseaux sols (Services Nationaux d'Observation soutenus par le CNES) effectuant un suivi de l'atmosphère est un point essentiel pour assurer la crédibilité des résultats qui seront obtenus.

Pour MERLIN, 59 spectres à haute sensibilité du multiplet R(6) de la bande 2v3 du méthane dans l'air ont été enregistrés au LIPhy. Des séries de spectres ont été enregistrées entre 243 et 313 K et pour chaque série, des valeurs de pression totale de 50, 100, 250, 500 et 750 Torr ont été adoptées. Courant 2022, une procédure d'ajustement multi-spectre avec le profil de raie Hartmann-Tran (HT), incluant le line-mixing au premier ordre, a été développée au LMD pour déterminer les paramètres spectroscopiques de chacune des six composantes du R(6), ainsi que la dépendance en température des paramètres de profil. Les résultats montrent que le modèle effectif ajusté est capable de reproduire les spectres expérimentaux avec une précision relative meilleure que 0,2% pour l'ensemble de la région spectrale du R(6) et meilleure que 0,05% à la position de la raie ON pour les spectres de 250, 500 et 750 Torr. Les comparaisons avec les mesures atmosphériques au sol montrent que ces données améliorent de manière significative la modélisation de l'absorption du méthane dans cette région spectrale. Ces résultats ont fait l'objet d'une publication dans JQSRT début 2023

Pour Microcarb, on pourra noter le développement au LSCE d'une nouvelle méthode pour obtenir des Niveau 2 basée sur les réseaux de neurone alors que les outils d'inversion traditionnels reposent sur une physique très détaillée du transfert radiatif atmosphérique. Une première version développée en 2020 donnait d'excellents résultats lorsque ses estimations étaient comparées à celles du modèle utilisé pour l'entraînement mais des problèmes liés au sur-apprentissage du réseau de neurone ont dû être corrigés. La nouvelle version du réseau de neurones appliquée aux données OCO (Fig. 5) donne des résultats de qualité similaire à ceux de l'algorithme opérationnel de la NASA mais avec des temps de calculs considérablement réduits. L'approche par réseaux de neurones comporte néanmoins des faiblesses, en particulier des biais élevés pour le traitement des données récentes, en dehors de la base d'apprentissage, car le problème d'estimation n'est pas stationnaire ici. Ces travaux doivent donc être consolidés dans la perspective de MicroCarb.

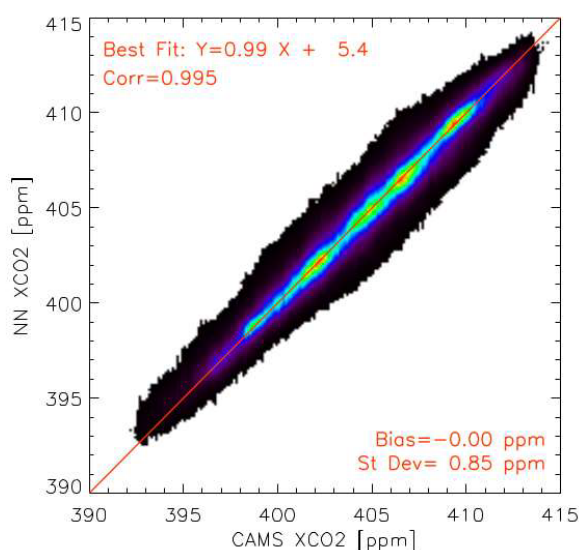


Fig. 5 : Histogramme de comparaison entre le XCO2 du modèle CAMS et les estimations issues du réseau de Neurone (Bréon et al., 2022).

Ces dernières années, le focus des missions de suivi du CO2 atmosphérique a évolué des flux naturels vers les émissions anthropiques et de nombreuses études se sont concentrées sur les panaches issus de villes ou d'installations industrielles. Le panache de CO2 qui sort de ces cibles d'intérêt est en effet de plusieurs parties par million (ppm) et peut être détecté par l'instrument OCO de la NASA. De nombreux auteurs ont ainsi réalisé des estimations d'émission qui sont comparées aux inventaires. Il reste que les cas favorables sont rares (de l'ordre d'un par semaine à l'échelle de toute la Terre) et les estimations entachées d'une forte incertitude. La thématique de l'observation spatiale des gaz à effet de serre a montré plus de succès avec le méthane. La concentration "de fond" de ce gaz est nettement plus faible que celle du CO2 ce qui fait que les panaches issus des

activités humaines sont plus faciles à distinguer. Par ailleurs, il y a de fortes incertitudes sur les émissions de méthane et les variations interannuelles de sa croissance (qui a atteint des niveaux record en 2021 et 2022) sont encore mal comprises. L'instrument TROPOMI sur Sentinel-5P ou des capteurs hyper-spectraux (S2, S3, PRISMA, EMITS...) ont permis des avancées notables dans ce cadre. Des fuites importantes de méthane ont pu être détectées, principalement aux Etats-Unis et en Asie sur les sites d'exploitation et de transport de gaz fossile. Plusieurs entreprises commerciales visent à observer le méthane à très haute résolution spatiale et ont montré des résultats spectaculaires de panaches bien identifiés avec une résolution spatiale de quelques mètres.

Les données d'IASI apportent également des informations dans les suivis des GES anthropiques. On relèvera l'étude de « l'excès troposphérique diurne » (DTE) du CO₂ vue par IASI, issue d'une thèse (cf. Fig. 6). Ce signal diurne provient de la combinaison du cycle diurne des émissions de CO₂ par les feux tropicaux et du transport de ces émissions (transportées durant la journée et « lessivées » durant la nuit). L'extension de ces travaux à la série complète des observations d'IASI marque la première utilisation des 15 années de l'instrument pour un tel objectif. Elle a notamment permis de révéler l'extraordinaire apport d'avoir trois IASI pour l'étude des signaux diurnes.

Ces travaux ouvrent une voie prometteuse à une meilleure caractérisation des feux dans la région tropicale.

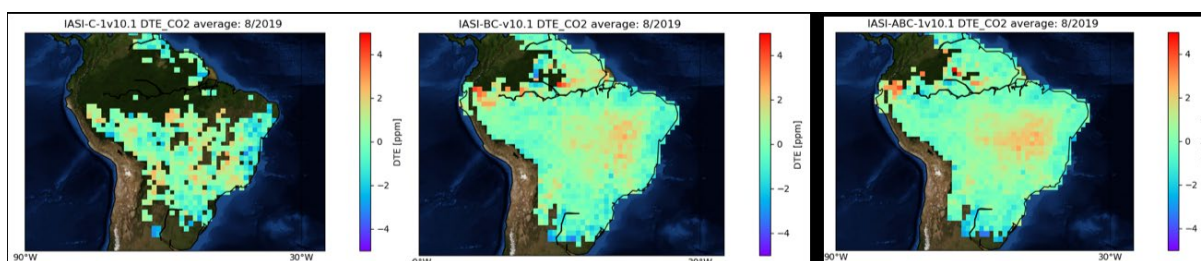


Fig. 6 : Estimation de l'excès diurne troposphérique de CO₂ pour le mois d'août 2019 à partir des observations de IASI-B (gauche), de IASI-B et C (milieu) et de IASI-A, B et C (droite). L'utilisation de 2 et 3 IASI permet d'augmenter significativement la couverture spatiale et de réduire le bruit, en faisant apparaître clairement les émissions de CO₂ au-dessus de l'arc de déforestation brésilien. (Crédit: Crevoisier, LMD/IPSL/CNRS).

IASI a également permis l'étude des rejets de méthane lors de l'explosion du gazoduc de Nord Stream en septembre 2022 avec l'adaptation des algorithmes d'estimation à ces régions difficiles. L'effort a porté sur l'utilisation d'un masque nuageux adapté, mais aussi sur une meilleure prise en compte des températures rencontrées dans ces régions. Les premières comparaisons avec des simulations réalisées par le Finnish Meteorological Institute (Fig. 7) semblent indiquer une bonne adéquation avec les signaux retrouvés par IASI.

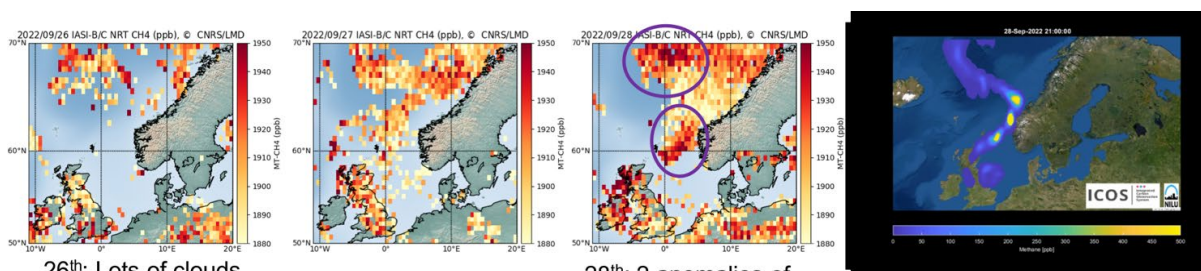


Fig. 7 : Champs de MT-CH₄ estimés par IASI-B et IASI-C le 26 (gauche), 27 (milieu-gauche) et 28 (milieu droite) septembre 2022 et simulation de CH₄ par le FMI (droite, <https://www.icos-cp.eu/event/1221>) pour le 28 septembre 2022

La mission FORUM a été décidée par l'ESA avec une date de lancement prévue en 2027. La France est bien représentée dans le groupe mission et le CNES soutient des activités de préparation.

La préparation des calibrations/validation des futures missions GES se poursuit à un bon rythme dans le cadre du projet MAGIC (développement et inter-comparaison de capteurs, campagnes de mesure...).

2.4. TRAVAUX D'ACCOMPAGNEMENT ET PREPARATOIRE DES MISSIONS ACTUELLES OU PREVUES

L'exploitation des observations issues des missions spatiales actuelles et à venir repose sur notre capacité à extraire leur contenu en information. Les observations doivent en effet être interprétées en termes de variables géophysiques d'intérêt pour différentes applications, que ce soit pour la caractérisation des conditions météorologiques, du suivi du climat ou encore de la qualité de l'air.

L'interprétation du signal mesuré depuis l'espace nécessite plusieurs éléments : (i) une base de données spectroscopiques documentant les raies d'absorption, éventuellement associée à une base de données de diffusion documentant les propriétés des particules d'intérêt, aérosols ou hydrométéores (i) un code de transfert radiatif permettant de faire le lien entre les variables géophysiques et l'espace des observations, (ii) un algorithme d'inversion ou d'assimilation.

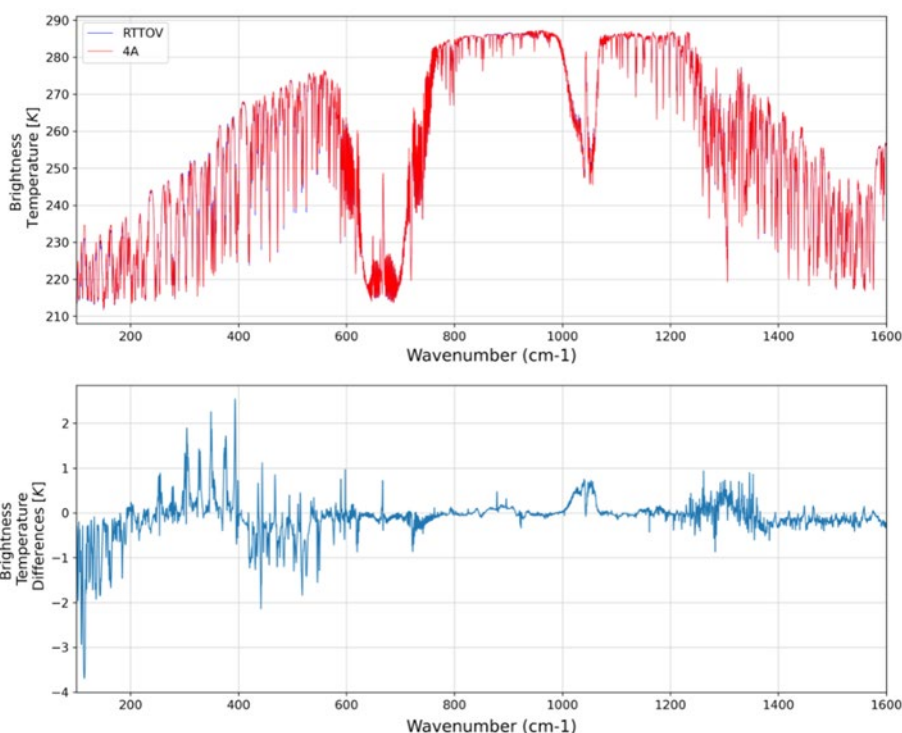


Fig. 8 : Moyenne de simulations de transferts radiatif de l'instrument FORUM, effectuées sur plus de 10 000 profils atmosphériques, avec les codes de transfert radiatif 4A/OP et RTTOV (figure du haut). Différences moyennes entre les simulations 4A/OP et RTTOV, dépassant plusieurs Kelvins entre 150 et 600 cm-1. (Crédits : CNRM/LMD)

Sur chacun de ces trois volets, des progrès significatifs ont été réalisés ces dernières années par la communauté française et la communauté européenne :

- Les bases de données spectroscopiques, documentant les différentes raies d'absorption des gaz et espèces chimiques, ont été maintenues, rendues plus précises et étendues à plusieurs domaines spectraux importants pour l'exploitation de missions à venir. Des travaux ont en particulier été réalisés dans l'Infrarouge pour la préparation à l'instrument IASI-NG, dans l'Infrarouge lointain pour la mission FORUM, dans l'Ultraviolet pour les missions Sentinel-4 et Sentinel-5 ainsi que dans le domaine micro-ondes submillimétrique pour l'instrument ICI. La Fig. 8 illustre le besoin de poursuivre ses travaux afin de comprendre les différences importantes qu'il peut y avoir entre simulations de transfert radiatif utilisant différentes bases de données pour les calculs, en particulier dans les domaines spectraux encore peu explorés tels que l'infrarouge lointain.
- Les bases de données de diffusion, documentant les interactions particules et rayonnement, ont été étendues aux nouveaux domaines spectraux d'étude comme le domaine micro-ondes submillimétrique pour l'instrument ICI.
- Les différents codes de transfert radiatif développés et maintenus par la communauté française ont été améliorés sur différents points. On peut citer la prise en charge par le code

de transfert radiatif rapide RTTOV des nouveaux instruments d'EPS-SG et de MTG ou encore la mise à disposition à la communauté d'une nouvelle version du logiciel 4A/OP permettant de réaliser des simulations de référence pour la mission IASI-NG.

- Des développements se sont aussi poursuivis sur des codes de transfert radiatif de référence permettant de prendre en compte les interactions entre particules et rayonnement : on peut citer le code McRALI pour la simulation en 3 dimensions de la propagation d'ondes électromagnétiques dans les nuages en préparation à la mission EarthCare ou encore le code 3DMCPOL pour la propagation d'ondes dans le visible dans les nuages en préparation à C3IEL et des observations des instruments CLOUD et LOIP. La Fig. 9 offre un exemple de simulation d'observations de la mission C3IEL pour ces deux instruments. Il est à noter que l'atelier sur le transfert radiatif TRATTORIA a été organisé par le CNES et l'INSU en 2020 à Toulouse. Il a regroupé des experts en code de transfert radiatif et en spectroscopie. Les présentations thématiques données à cet atelier sont très utiles pour la communauté ainsi que pour la formation des jeunes scientifiques sur la thématique. De nouvelles éditions suivront.

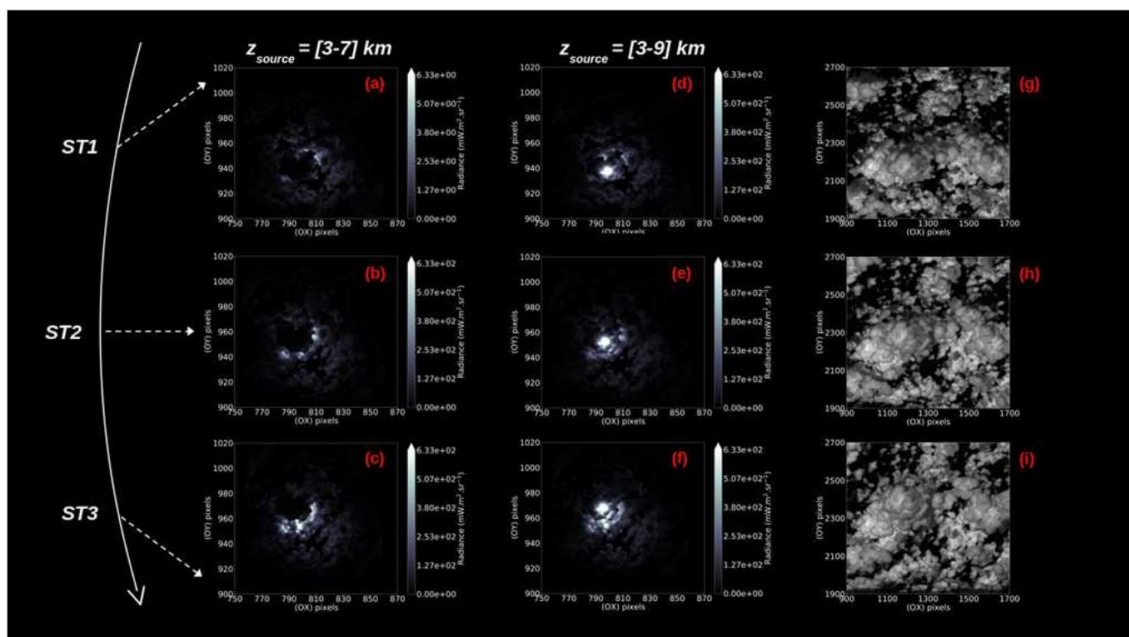


Fig. 9 : Images simulées de nuit pour les imageurs d'éclairs pour une configuration de 3 satellites pour un éclair dont le sommet atteint 7 km (a, b, c), et 9 km (d, e, f). L'éclair est représenté par un segment vertical avec une base fixe à 3 km, et le sommet du nuage est à 9,25 km. La structure des nuages telle que simulée de jour avec 3DMCPOL pour les caméras CLOUD aux mêmes positions des satellites est présentée en (g, h, i). Le sommet de la zone convective dans laquelle se trouve l'éclair est indiqué par un point rouge (g, h, i). (Crédits : LOA)

Concernant les algorithmes d'inversion, des progrès importants ont aussi été réalisés par la communauté française. On peut citer les travaux sur l'inversion de différentes espèces chimiques, permettant d'améliorer nos connaissances sur les émissions de gaz à effet de serre mais aussi des polluants. Si les techniques d'inversion variationnelles demeurent les plus utilisées aujourd'hui, il est important de noter l'importance croissante de l'IA dans la discipline. L'application de l'IA à l'inversion géophysique est assez ancienne, néanmoins les nouveaux algorithmes d'apprentissage profond aujourd'hui disponibles, associés à la disponibilité de très gros jeux de données et à la mise à disposition de clusters GPU permettent d'envisager de nouvelles approches pour l'exploitation des observations spatiales. Ces réseaux de neurones profonds sont capables d'apprendre des modèles directement à partir des données en ajustant leurs paramètres de manière itérative. Les réseaux convolutionnels profonds sont particulièrement bien adaptés à l'exploitation d'images satellitaires et peuvent extraire automatiquement des hiérarchies de caractéristiques pertinentes à partir des données spatiales, sans avoir besoin de comprendre la physique sous-jacente. Dans la phase d'apprentissage du modèle, les algorithmes reçoivent des observations spatiales en entrée ainsi que des sorties souhaitées. Une fois que le réseau de neurones est entraîné, il peut être utilisé pour estimer des grandeurs géophysiques à partir de nouvelles observations spatiales. Pour l'estimation

quantitative des précipitations, le modèle neuronal a appris à partir des champs de températures de brillance (TB) observées par le radiomètre imageur GMI à restituer les champs précipitants observés par le DPR dans la fauchée de ce dernier (Fig. 10). Il peut ensuite estimer les champs précipitants sur toute la fauchée du radiomètre uniquement à partir des champs de températures de Brillance. Contrairement aux modèles physiques traditionnels qui nécessitent une compréhension approfondie de la physique sous-jacente, les algorithmes d'IA peuvent être plus flexibles et s'adapter à des situations complexes à des observations hétérogènes (synergie instrumentale) ou des phénomènes pour lesquels nous ne disposons pas de modèles physiques précis.

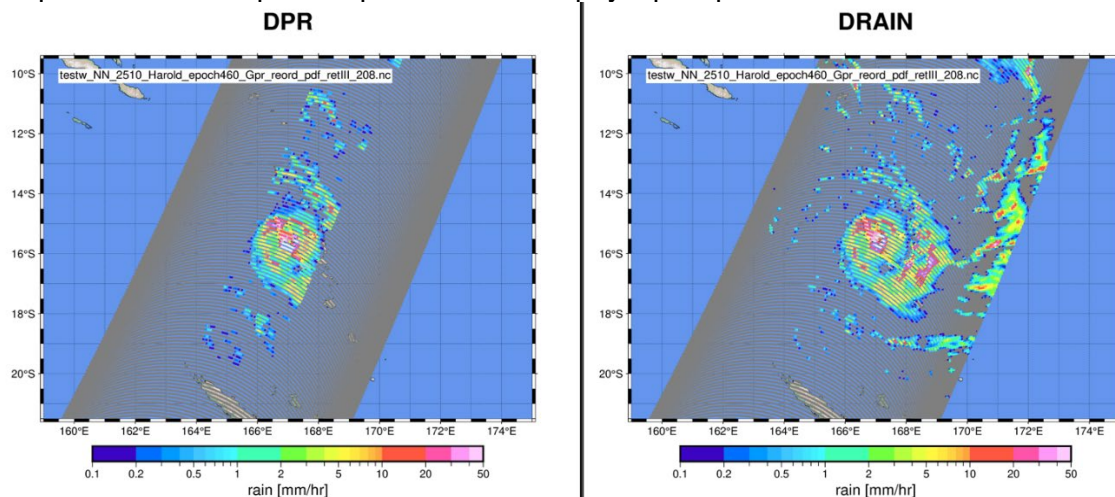


Fig. 10 : Exemple de restitution de la pluie instantanée pour le cyclone Harold, observé le 6 avril 2020. A gauche, l'image de référence de la pluie de surface du Dual-frequency Precipitation Radar (DPR) de GPM-core. A droite, la restitution proposée par DRAIN à partir du GPM Microwave Imager (GMI) présent sur la même plateforme. (Crédits : LATMOS)

Une tendance forte est d'utiliser les informations issues de plusieurs missions spatiales afin d'effectuer des inversions. Les algorithmes d'inversion actuels permettent en effet souvent d'utiliser en entrée plusieurs types d'observations, l'enjeu étant d'exploiter au mieux la synergie instrumentale. La Fig. 11 montre un exemple d'amélioration des inversions de profils de glace en utilisant de manière combinée les instruments FCI, MWI et ICI. Cette figure montre également que la synergie instrumentale peut-être bridée en présence d'erreurs dans l'information a priori de l'inversion, dans le cas présence dans la modélisation physique des nuages et des précipitations. Il apparaît donc très important d'investir dans l'amélioration des modèles afin de mieux exploiter les observations spatiales.

Enfin, il est à noter les avancées récentes en matière d'outils permettant de contribuer à la spécification de futures missions spatiales, en particulier dans un contexte où des systèmes d'observations dits "désagrégés" sont en réflexion dans de nombreuses agences. Une étude a par exemple montré le besoin en précision de mesure afin d'estimer le toluène au voisinage des feux, précision qui sera a priori encore insuffisante avec IASI-NG même pour les concentrations en toluène les plus fortes. On peut aussi citer les travaux d'expériences de simulations de systèmes d'observations, permettant d'évaluer l'apport sur la qualité de la prévision météorologique de constellation d'instruments comme la constellation CMIM ainsi que la constellation EPS-Sterna. Ces outils ont notamment permis de réaliser des expériences, dont les résultats ont nourri les études sur les bénéfices socio-économiques de cette dernière. Ils se révéleront également utiles dans le cadre des réflexions autour de MetOp Troisième Génération qui devraient démarrer en 2026.

Réduction d'erreur pour la restitution de la glace liée à la synergie FCI/MWI/ICI

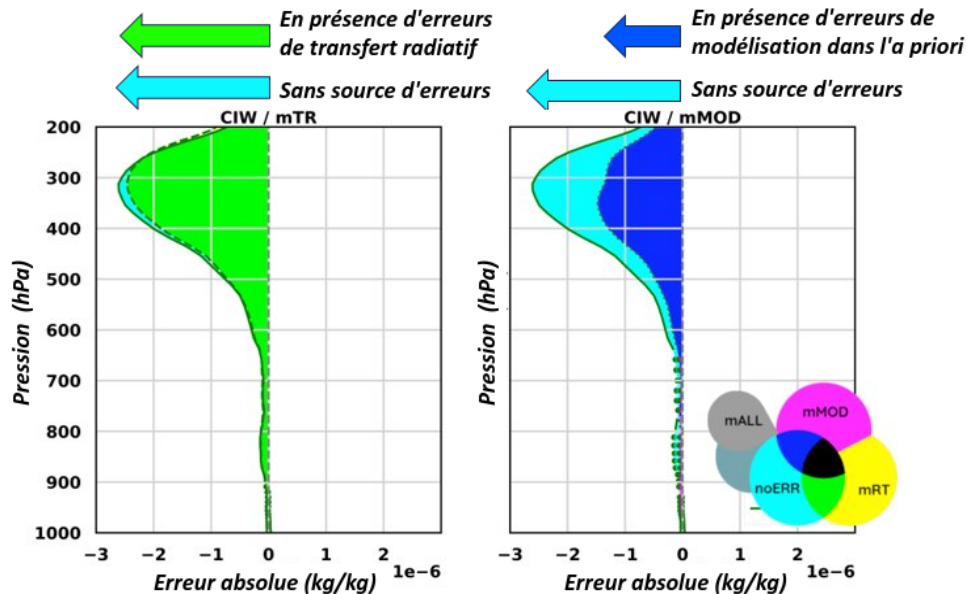


Fig. 11 : Réduction d'erreur sur l'inversion de profils de glace nuageuse grâce à la synergie instrumentale infrarouge micro-ondes (FCI, MWI, ICI): en bleu clair sans sources d'erreurs ni de transfert radiatif, ni de modélisation dans l'information a priori, en vert avec des erreurs de transfert radiatif sur la représentation de la diffusion dans l'infrarouge et les micro-ondes, et en bleu avec des erreurs de modélisation des nuages et des précipitations dans l'information a priori de l'inversion. (Crédits: CNRM).

2.5. OBSERVATIONS AU SOL, SOUS BALLON OU AEROPORTEES

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

Ces dernières années un effort important a été mené pour créer de nouvelles synergies d'observations impliquant des aéronefs autant au niveau français qu'europpéen. Cet effort a permis l'organisation de plusieurs campagnes de mesures dans le cadre de l'infrastructure de recherche européenne HEMERA ou de validations satellite (CADDIWA validation AEOLUS, MAGIC validation missions GES). Les campagnes MAGIC ont notamment permis de fédérer des mesures ballons (BLD, BSO) avec des mesures sol (FTIR, Lidar) et aéroportées (avions SAFIRE/BAS/DLR, drones). Dans le futur, ce type d'initiative sera soutenue par la nouvelle infrastructure de recherche In'Air dont l'objectif est de regrouper l'ensemble des aéronefs instrumentés (ballons, avions, drones). De telles campagnes de mesures sont essentielles pour comprendre les processus à fine échelle non accessibles depuis l'espace. Malheureusement il est actuellement difficile de maintenir l'ensemble des moyens historiques et notamment le jet de SAFIRE dont le renouvellement pose encore question. Un appel à manifestation d'intérêt a en effet conduit à relever substantiellement le coût de l'acquisition et de transformation d'un nouveau porteur. Le budget nécessaire n'est actuellement pas réuni malgré l'abondement du PIA 3. Il est aussi inquiétant que le succès d'HEMERA n'ait pas permis son renouvellement ou que le CNES rencontre des difficultés pour maintenir son savoir-faire ballon (p.ex. fiabilité des enveloppes des ballons BPS).

La division Ballons du CNES a développé ces dernières années de nombreux projets innovants pour diversifier son offre de vol ballon. On peut notamment citer les ballons pressurisés stratosphériques qui ont permis de réaliser la 1ere campagne STRATEOLE-2 aux Seychelles début 2022. Les vols sous BLD à Aire-sur-Adour se sont également multipliés avec l'arrivée d'instruments miniaturisés comme les instruments LOAC, Amulse ou Aircore. Les vols transcontinentaux de longues durées sont actuellement en test entre le site suédois de Kiruna et les côtes canadiennes. Le site Brésilien a récemment été sélectionné dans la région de Tocantins à Las Palmas pour une première campagne prévue en 2026. Cette base tropicale est fortement attendue par la communauté scientifique. Elle viendra renforcer les vols annuels effectués en alternance sur les sites canadien (Timmins) et suédois (Kiruna). Le CNES a également soutenu le développement des Aéroclippers nouveau type de ballons dérivants pour le suivi des cyclones (campagnes MICA). Actuellement des

études sont en cours pour proposer de nouveaux ballons stratosphériques permettant de réaliser des vols de plus longues durées (BLD plafonnant STELLA, ballon manœuvrant HEMERIA BalMan). Des efforts sont également menés par le CNES pour ouvrir l'activité ballon au monde académique via le financement de vols BLD pour étudiants sur sa base d'Aire-sur-Adour souvent en synergie avec les centres spatiaux universitaires. Ces dernières années les études ballons se sont ouvertes à d'autres communautés notamment pour l'étude de l'effet des rayons cosmiques sur les cellules humaines (projet BERNADOTTE).

Le CNES continue de soutenir la Plateforme de Mesures Aéroportées (PMA) qui est une suite d'instruments permettant de caractériser les propriétés microphysiques et optiques des particules nuageuses in situ. Cette plateforme est régulièrement utilisée lors de campagnes aéroportées comme ce fut le cas durant les campagnes DACCIWA (interactions aérosol/nuage en Afrique de l'Ouest), EXAEDRE (électrification des nuages), EUREC4A (nuages et réchauffement climatique) et HAIC (givrage par cristaux de glace en aéronautique).

Actuellement il existe peu de réseaux de mesures ballons ou drones à part ceux dédiés à la surveillance de la couche d'ozone. La situation est différente concernant les mesures sol souvent coordonnées dans des infrastructures européennes comme ICOS ou ACTRIS. Les sites ACTRIS français soutenus par le CNES (OHP, SIRT, COPPD, LOA, MAIDO) fournissent notamment des jeux de données lidar avec une cohérence multi-sites d'une très grande importance pour la validation des missions passées comme AEOLUS ou CALIOP et future comme EarthCare. ACTRIS peut également faire appel à des moyens projetables sur sites d'intérêt (pour se rapprocher par exemple d'un point de croisement des orbites d'un satellite à valider).

Des initiatives récentes ont été menées avec succès pour mieux coordonner ces mesures sol et ballon. On peut citer d'une part le lancement de vols ballons (Aircore, LOAC) à la station ICOS de Trainou et d'autre part l'instrumentation sol (FTIR, Lidar) de la base du CNES d'Aire-sur-Adour. Un consortium européen existe également pour coordonner les études basées sur les mesures Aircore. Cette difficulté aux ballons d'intégrer des réseaux existants est un frein au développement de techniques de mesures embarquées. Il est en effet difficile de se projeter dans de longues et coûteuses campagnes de validation sans un soutien pérenne. Ce point est notamment critique pour la validation des prochaines missions spatiales européennes comme EarthCare, IASI-NG et FORUM ou nationales comme MERLIN et MicroCarb. Toutefois l'ESA soutient régulièrement des campagnes de validation satellite comme ce fut le cas pour la validation AEOLUS durant la campagne CADDIWA au Cap Vert. L'ESA soutient également la communauté française (mobilisée au sein du projet EECLAT), pour préparer la validation des produits EarthCare via des campagnes coordonnées sol-avion-ballon exploitant les capacités uniques en Europe du dispositif radar-lidar embarqué RALI. Le CNES soutient aussi les campagnes annuelles MAGIC préparant la validation des missions GES et les vols ballons LOAC à Aire-sur-Adour en coïncidence avec CALIOP. Ces campagnes sont notamment l'occasion d'embarquer au sein des avions SAFIRE, les démonstrateurs des futures missions satellites. On peut citer CHARM-F pour MERLIN, OSIRIS pour 3MI ou FIRMOS pour FORUM. Les compétences françaises en vol suborbital seront également très pertinentes pour valider les produits de la future mission AOS. Il est important de rappeler l'importance du réseau IAGOS pour l'étude des processus atmosphérique de la haute troposphère.

La communauté française a également montré un fort dynamisme dans le développement de nouveaux instruments sous ballon : spectromètre IR (SPECIES), hygromètre (pico-SDLA, micro-hygromètre), Lidar (BECOL), collecteur d'aérosols (BESAFE), radar (Sapheraler), hydrogène (ARCHE). Ces instruments pourront être utilisés individuellement ou regroupés au sein de nacelles dédiés à une question scientifique comme les phénomènes convectifs, les feux de biomasse ou les gaz à effet de serre. Ces instruments sont potentiellement déployables sur différents vecteurs ce qui multipliera les opportunités de campagnes durant les périodes de validation des prochaines missions CIEL, EarthCare, IASI-NG, FORUM, Sentinel-5, MERLIN et MicroCarb. L'infrastructure européenne HEMERA a régulièrement soutenu le développement et l'intercomparaison de tels instruments (p.ex. campagne AQUAVIT-4).

Cette même communauté s'est également structurée pour organiser des campagnes BLD en autonomie sur différents sites à Reims, à Trainou, au Puy de Dôme et à Orléans. La multiplication des sites de lancement est un atout certain durant les campagnes de validation car cela augmente la chance de coïncidence entre la trajectoire du ballon et la trace du satellite. De plus, la

miniaturisation croissante des instruments va permettre d'organiser des vols BLD sur alerte pour l'étude de phénomènes difficilement prévisibles comme les éclairs, les éruptions volcaniques ou les méga-feux de plus en plus fréquents dans les 2 hémisphères. Dans ce cadre, le projet OREO est une très bonne opportunité de relancer l'étude des TLE (Transient Luminous Event) après l'échec de Taranis. Le projet SOLID vise aussi à structurer la communauté française autour de l'électrique atmosphérique et notamment la détection et la caractérisation de la foudre, dans le cadre des missions actuelles ISS-ASIM, et MTG-LI et futures C3IEL et STRATELEC. Le projet a notamment pour objectif de développer l'instrumentation au sol sur le territoire français.

Toutes ces mesures sont et seront d'une grande utilité pour améliorer les produits Copernicus et la prévision numérique du temps des agences météorologiques. Ces mesures permettront de détecter les éventuels biais des simulations comme la surestimation du méthane stratosphérique dans les produits CAMS. La correction de ces biais permettra de fournir des profils a priori plus réalistes aux équipes d'inversion des futures missions satellites. Les mesures ballons obtenues dans la région de la haute troposphère - basse stratosphère durant la campagne STRATEOLE-2 ont déjà permis d'améliorer la prévision numérique du temps dans la bande équatoriale où peu de mesures sont disponibles via l'assimilation des données dans les modèles de Météo-France.

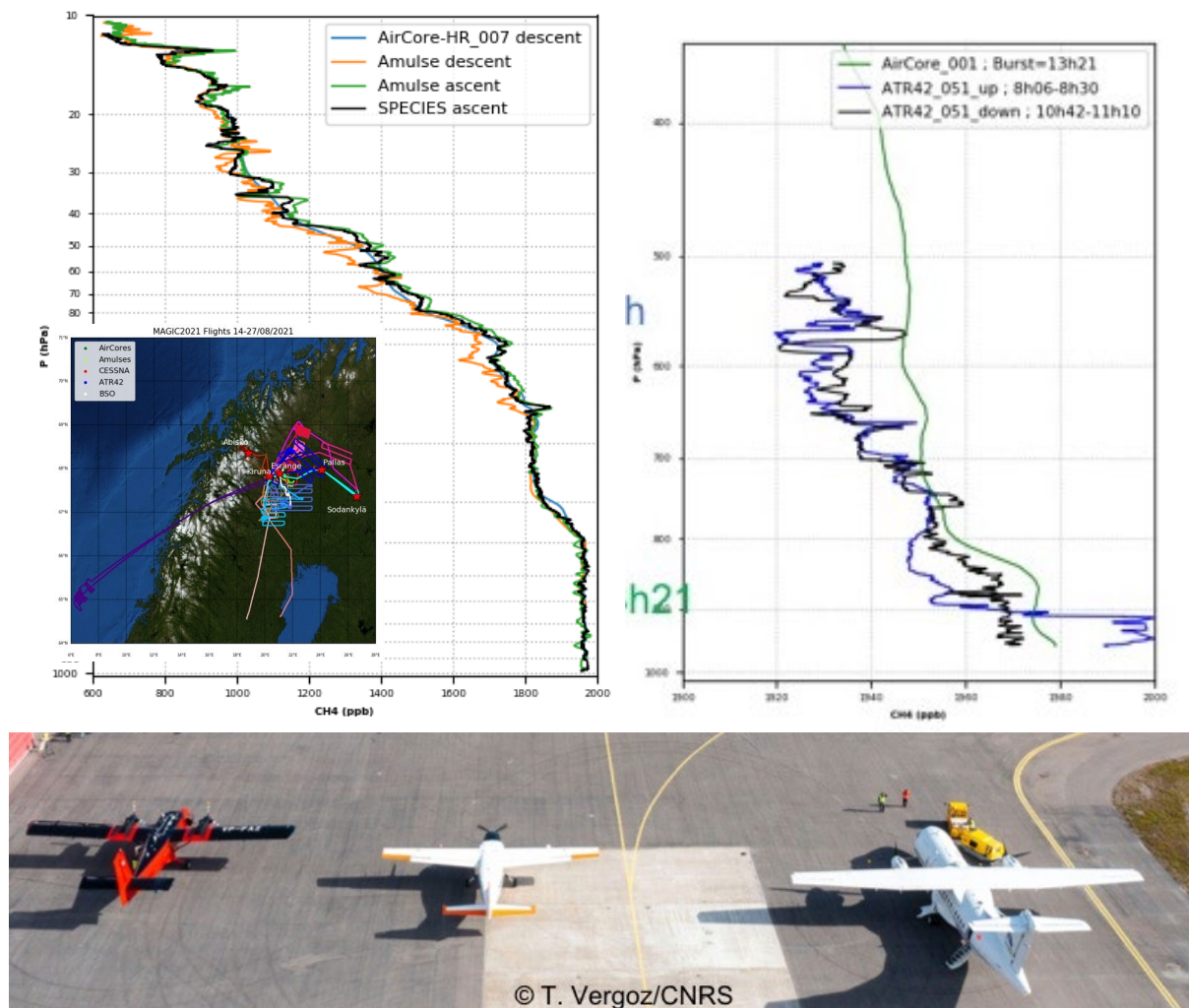


Fig. 12 : Campagne MAGIC 2021. Carte en médaillon : trajectoires des vols par vecteur.

Figure de gauche : profils de CH4 AirCore-HR (bleu), Amulse en montée (vert) et descente (orange) et SPECIES (noir).

Figure de droite : profils de CH4 mesurés par l'ATR42 et mesurés par un AirCore-light le 17 août 2021.

Figure du bas : Twin Otter du BAS (gauche), Cessna-Caravan du DLR (milieu) et ATR42 de SAFIRE (droite) à l'aéroport de Kiruna.

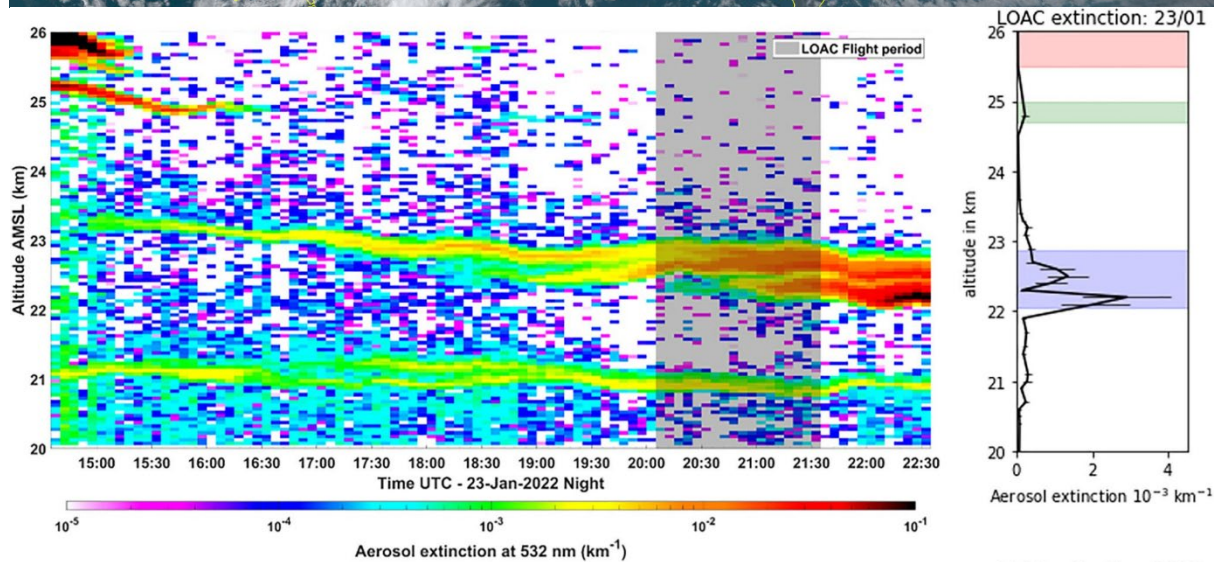
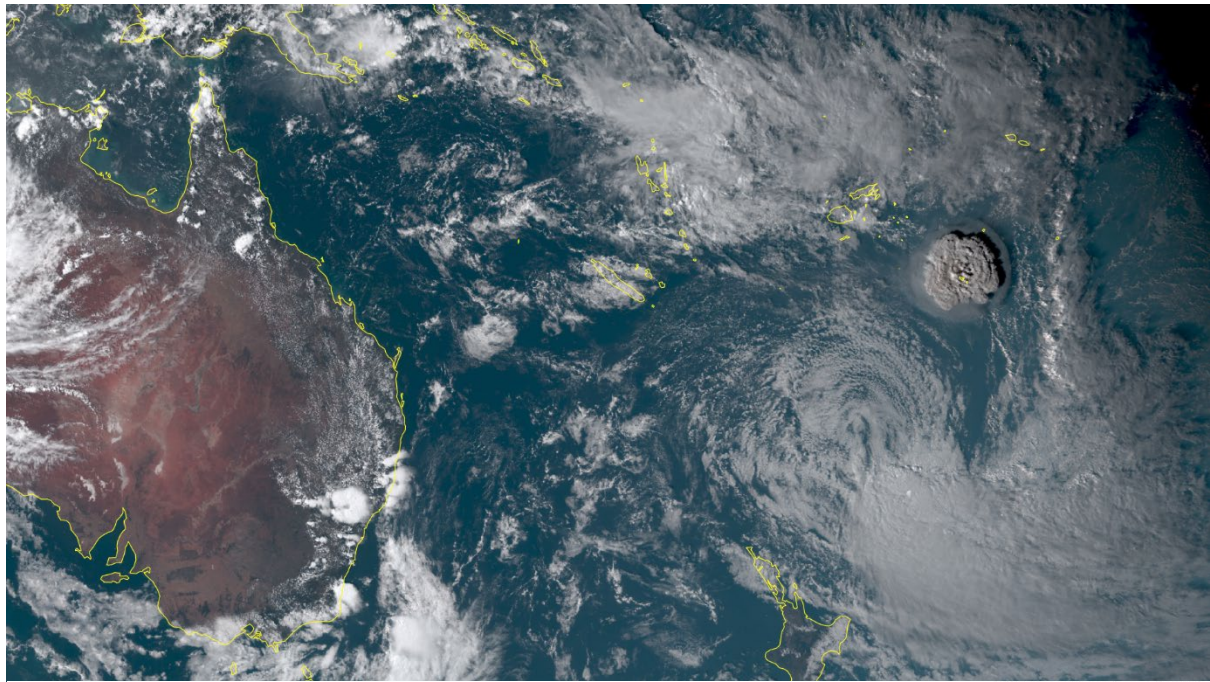


Fig. 13 : Panache volcanique lors de l'éruption du volcan Hunga-Tonga le 14 janvier 2020 observé par le satellite HIMAWARI-8 (en haut, crédits Japan Aerospace Exploration Agency, Earth Observation Research Centre) et observé 9 jours plus tard simultanément par le Lidar de l'observatoire de l'île de La Réunion au Maïdo (OPAR, en bas) et durant un vol BLD équipé du compteur d'aérosol LOAC (Kloss et al., 2020, en bas à droite).

3. REFERENCES

- Bréon, F.-M., David, L., Chatelanaz, P., and Chevallier, F.: On the potential of a neural-network-based approach for estimating XCO₂ from OCO-2 measurements, *Atmos. Meas. Tech.*, 15, 5219–5234, <https://doi.org/10.5194/amt-15-5219-2022>, 2022
- Brognez H., R. Roca, F. Auguste, J.-P. Chaboureau, Z. Haddad, S. J. Munchak, X. Li, D. Bouniol, A. Debe, T. Fiolleau and P. Kollias (2022). Time-Delayed Tandem Microwave Observations of Tropical Deep Convection: Overview of C2OMODO Mission, *Front. Remote Sens.*, 3:854735, <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.854735>.
- Khaykin S., Podglajen A., Ploeger F. et al., 2022a. Global perturbation of stratospheric water and aerosol burden by Hunga eruption. *Commun. Earth Environ.*, 3, 316. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00652-x>.
- Khaykin, S., Legras, B., Bucci, S., Sellitto, P., Isaksen, L., Tencé, F., Bekki, S., Bourassa, A., Rieger, L., Zawada, D., Jumelet, J., Godin-Beekmann, S. (2020). The 2019/20 Australian wildfires generated a persistent smoke-charged vortex rising up to 35km altitude. *Communications Earth & Environment*, 1(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00022-5>
- Kloss, C. et al. Aerosol characterization of the stratospheric plume from the volcanic eruption at Hunga Tonga 15 January 2022. *Geophys. Res. Lett.* 49, <https://doi.org/10.1029/2022GL099394> (2022).
- Lemmouchi, F.; Cuesta, J.; Eremenko, M.; Derognat, C.; Siour, G.; Dufour, G.; Sellitto, P.; Turquety, S.; Tran, D.; Liu, X.; et al. Three-dimensional Distribution of Biomass Burning Aerosols from Australian Wildfires Observed by TROPOMI Satellite observations. *Remote Sens.*, 14, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14112582>
- Saint-Lu M., S. Bony, J.-L. Dufresne (2020). Observational evidence for stability Iris effect in the Tropics, *Geophysical. Res. Lett.*, 47(14), <https://doi.org/10.1029/2020GL089059>
- Sellitto, P., Podglajen, A., Belhadji, R. et al. The unexpected radiative impact of the Hunga Tonga eruption of 15th January 2022. *Commun Earth Environ* 3, 288 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00618-z>.
- Sourdeval O., E. Gryspeerdt, M. Kramer, T. Goren, J. Delano, A. Afchine, F. Hemmer and J. Quaas (2018). Ice crystal number concentration estimates from lidar-radar satellite remote sensing - Part1: Method and evaluation, *Atmos. Chem. And Phys.*, 18, 14327-14350, <https://doi.org/10.5194/acp-18-14327-2018>.