

La mesure des émissions de CO₂ depuis l'espace et la compréhension de leurs évolutions

Par Philippe LANDIECH

Chef de projet MicroCarb au Centre national d'études spatiales (Cnes)

Et François Marie BRÉON

Responsable scientifique de la mission MicroCarb, CEA-LSCE

Le CO₂ est le principal gaz à effet de serre dont l'augmentation de la concentration dans l'atmosphère est responsable du changement climatique. La concentration « de fond » en augmentation annuelle de l'ordre de 2,5 ppm, est mesurée au sol avec une très haute précision sur une centaine de sites dans le monde. Cette concentration montre des variations saisonnières importantes en particulier dans l'hémisphère nord. Ces variations sont dues aux flux naturels du carbone : absorption par les végétaux par le processus de la photosynthèse, émissions lors de la respiration des plantes, échanges avec les masses d'eau océaniques... Le principe de ces échanges est bien compris mais ils sont encore mal quantifiés. En plus du besoin de connaître les émissions anthropiques de CO₂ et leur évolution dans le temps, cette meilleure quantification des flux naturels passe par une mesure dense aussi bien spatialement que temporellement des concentrations. L'observation spatiale est bien adaptée à cet objectif. Le satellite MicroCarb, de 180 kg, développé par le Cnes et emportant un spectromètre à réseau dispersif compact, devrait être lancé en 2024 et prendre le relais du satellite OCO-2 de la NASA, précurseur en la matière. Des satellites opérationnels devraient leur succéder, afin de remplir ce besoin de densification des mesures, notamment dans le cadre du projet européen Copernicus.

L'APPORT DU SPATIAL POUR LA MESURE DU CO₂

Plusieurs rapports¹ et ² ont souligné la contribution nécessaire des systèmes spatiaux à la surveillance et à la compréhension du cycle du carbone. Une meilleure compréhension est essentielle dans le contexte du changement climatique actuel, causé par l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et ayant un fort impact sur les écosystèmes qui régulent le cycle naturel du carbone. L'augmentation récente des émissions de CO₂ liées aux activités humaines (et en particulier la combustion de combustibles fossiles) a rompu l'équilibre naturel existant. Elle est cependant partiellement compensée par un effet de puits des océans et des surfaces terrestres (végétation). Une question clé est de savoir comment ces puits évolueront à l'avenir, car le changement climatique peut avoir un

¹ CEOS (2014), "Strategy for carbon observations from space", CEOS report April 2014.

² IPCC (2013), "Fifth Assessment Report - Climate Change 2013".

impact significatif sur les écosystèmes. Le principe des échanges entre milieux est certes bien compris mais ils sont encore mal quantifiés. Ainsi, on observe des anomalies très importantes du taux de croissance atmosphérique du CO_2 lors des événements El Niño et autres anomalies climatiques, ou du fait des grands incendies qui se multiplient avec le changement climatique. En plus du besoin de connaître les émissions anthropiques de CO_2 et leur évolution dans le temps, il est donc primordial de comprendre les flux naturels. Si les mesures *in situ* (en surface) de la concentration des gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , N_2O ...) fournissent des mesures de haute précision, elles restent inégalement réparties sur la surface de la terre et sont difficiles à inter-étalonner. À l'inverse, un système spatial peut collecter des données de manière globale et homogène, si les conditions météorologiques le permettent (absence de couvert nuageux).

La communauté réclame désormais un système opérationnel capable de combiner les inventaires, les mesures *in situ* et les observations spatiales, avec des exigences ambitieuses pour le système spatial en termes de précision, de résolution spatiale, de couverture et de temps de revisite³. Dans le cadre de la COP-21, qui s'est tenue en décembre 2015 à Paris, le Gouvernement français a annoncé la décision de mener à bien le développement du programme MicroCarb et a demandé au CNES de conduire les travaux, conjointement avec la communauté scientifique nationale. Ce projet se situe entre la mission pionnière, toujours en fonctionnement, OCO-2 (USA) et un futur système opérationnel tel que Copernicus CO2M, dont la mission se concentrera principalement sur la quantification des flux anthropiques. MicroCarb, dont le lancement est prévu en 2024, assurera la continuité de la surveillance du CO_2 et explorera également des concepts d'instruments innovants qui pourraient s'avérer être des pierres angulaires pour de futurs instruments et missions. MicroCarb est un microsatellite d'une masse totale d'environ 180 kg, composé d'un instrument compact, conçu pour la surveillance des concentrations de CO_2 dans la colonne d'atmosphère, aménagé sur une plateforme issue de la ligne de

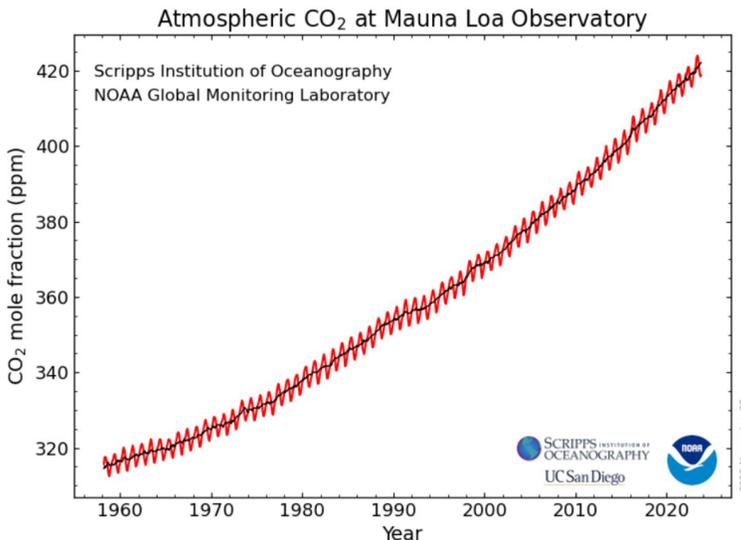


Figure 1 : L'augmentation observée du CO_2 depuis les années 1960 (Source NOAA).

³ CEOS (2018), "Atmospheric Composition Virtual Constellation Greenhouse Gas Team. A constellation architecture for monitoring carbon dioxide and methane from space", 8 October 2018.

produits Myriade développée par le CNES et déjà utilisée pour une vingtaine de satellites scientifiques ou militaires. Malgré un volume et un coût de développement bien inférieurs à ceux d'OCO-2, MicroCarb devrait fournir une précision de mesure conforme aux recommandations internationales⁴.

UNE PHYSIQUE DE LA MESURE TRÈS COMPLEXE

On distingue trois grands concepts instrumentaux aptes à mesurer le CO₂ depuis l'espace, les actifs à base de Lidars et les passifs utilisant soit le rayonnement émis par le soleil et réfléchi par la surface de la terre, soit le rayonnement infrarouge émis par l'atmosphère. Pour la mesure Lidar, on utilise des impulsions à deux longueurs d'onde proches, choisies pour leur propriété à subir des absorptions énergétiques différentes par les molécules de CO₂. Le rapport des mesures peut être relié à la concentration moyenne dans l'atmosphère. Avec les mesures basées sur le rayonnement du Soleil, la lumière traverse deux fois l'atmosphère et le signal retour est analysé au travers d'un spectromètre qui va permettre de mesurer la profondeur des raies d'absorption (*cf.* Figure 2 ci-dessous) qui est reliée à la quantité de molécules de CO₂ dans l'atmosphère.

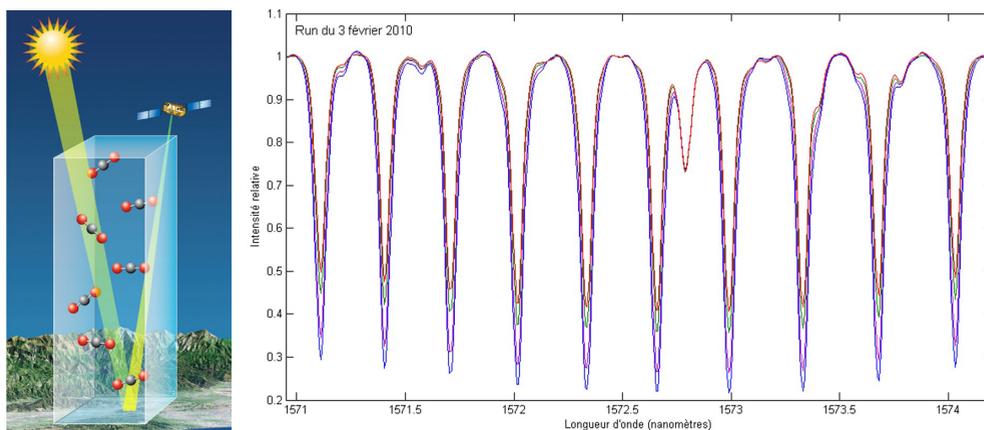


Figure 2 : Principe de mesure (Source : Cnes).

Cette mesure est donc reliée à la concentration du CO₂ dans l'air (la quantité recherchée), mais aussi à l'épaisseur de l'atmosphère qui est en lien avec la pression de surface. Cette pression varie considérablement avec l'altitude du point visé. C'est pourquoi une mesure complémentaire est nécessaire pour laquelle on applique le même principe à des raies d'absorption générées par l'oxygène atmosphérique. Cette mesure donne accès à la pression de surface, la relation entre la quantité d'oxygène et la pression de surface étant homogène et très bien connue.

La mesure ne peut être valide qu'en cas de ciel dégagé de tout nuage, sans quoi la lumière sera réfléchi par les nuages et non par la surface terrestre, ce qui reviendra à négliger les couches basses de l'atmosphère, qui se trouvent être les plus denses.

La taille du pixel au sol résulte de l'ouverture de l'instrument et de la résolution de ses détecteurs. Dans ce pixel, le signal mesuré dépend de l'albédo, en lien avec la nature des

⁴ GLOBAL CLIMATE OBSERVING SYSTEM (2011), "Systematic observation requirements for satellite-based data products for climate", GCOS-154, December 2011.

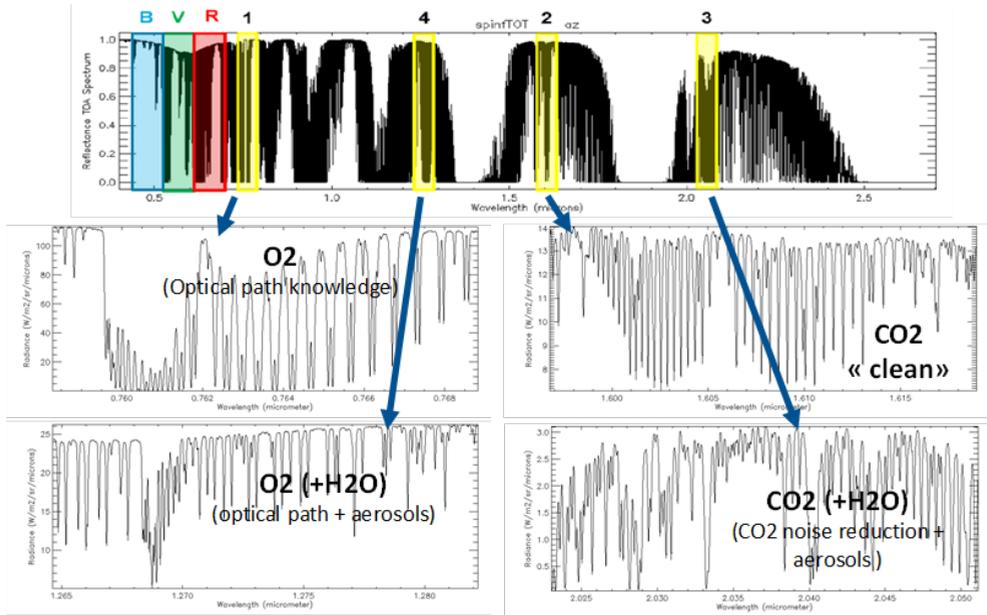


Figure 3 : Positionnement des bandes MicroCarb dans le spectre de transmission atmosphérique visible et proche IR (Source : Cnes).

sols et l'état du couvert végétal, mais aussi de la pente du terrain observé. Viennent s'y ajouter des effets induits comme la fluorescence de la végétation induite par les processus chimiques de la photosynthèse.

En pratique, l'interprétation des mesures de MicroCarb fera appel à des modèles numériques de terrain globaux, additionnés de tapis d'images pouvant donner à plusieurs saisons une estimée de cet état de surface. Des systèmes globaux comme Copernicus, sont à même de fournir périodiquement de telles bases de référence.

D'autres effets sont à considérer pour traduire les spectres mesurés en concentrations de CO_2 atmosphérique. Ainsi, la présence d'aérosols dans l'atmosphère modifie le trajet optique du signal mesuré (de façon potentiellement plus complexe que les nuages), et doit donc être prise en compte. De même, les atomes d'oxygène de la très haute atmosphère, excités par le rayonnement solaire, émettent une lumière (phénomène appelé "Airglow") qui contribue au signal mesuré et doit être déduit.

Une fois en vol, l'instrument devra être étalonné, pour pouvoir interpréter les comptes numériques du détecteur en termes de luminance. Pour ce faire, on se base sur des mesures dans des conditions qui sont bien connues. Ainsi, on pourra utiliser les mesures de nuit pour évaluer le *dark*, des lampes calibrées placées devant les détecteurs, mais aussi dans le cas des systèmes passifs, des visées directes de l'instrument vers la Lune ou à travers d'atténuateurs vers le Soleil, ce qui permet d'évaluer directement la mesure à un spectre connu.

Les algorithmes d'inversion permettent d'interpréter les spectres mesurés en termes de CO_2 atmosphérique. Pour avoir un intérêt scientifique, l'estimation de la concentration de CO_2 doit avoir une précision qui est significativement meilleure que le ppm (partie par million = 10^{-6}). On a vu que le signal global du CO_2 avait dépassé 400 ppm, ce qui fixe un niveau de précision relative très exigeant. Notons que la mesure du CH_4 atmosphérique est plus "facile" car les signaux observés sont, en relatif, nettement plus forts que ceux du CO_2 .

L'INSTRUMENT ET LE SATELLITE MICROCARB

L'instrument MicroCarb est passif et utilise le concept du réseau à échelle pour disperser la lumière dans les 4 bandes spectrales considérées, 2 pour échantillonner les raies d'absorption du CO₂ et 2 pour les raies d'absorption de l'oxygène. Cet instrument a été développé par Airbus sur la base d'un concept du CNES. Pour être emporté sur un microsattellite de 180 kg au total, 80 kg sont alloués à l'instrument, ce qui implique une très grande compacité. Le concept optique permet ainsi de « replier » les 4 bandes spectrales sur une même matrice de détection, au moyen de prismes intermédiaires puis à travers des fentes calibrées avant d'attaquer le réseau dispersif et de finalement étaler les spectres sur le détecteur.

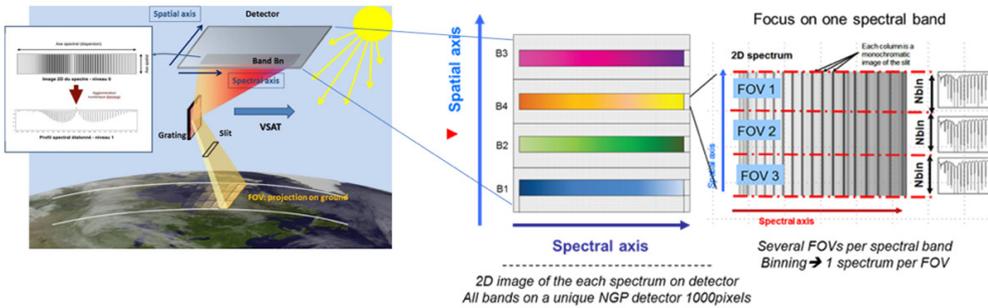


Figure 4 : Concept instrumental (Source : Cnes).

Le concept optique comprend un télescope et un spectromètre. Une partie du signal en sortie du télescope est dirigée vers le spectromètre, l'autre vers un imageur, ce qui permet d'obtenir, en plus des spectres à très haute résolution, des images de la scène et y détecter la présence ou non de nuages. Pendant la phase d'étalonnage, ces images permettent aussi d'affiner la connaissance du positionnement du champ de vue au sol, par comparaison à des images de référence géolocalisées. La matrice de détection du spectromètre, quant à elle, ne reflète qu'une dimension spatiale, la seconde dimension étant utilisée pour balayer les longueurs d'onde des bandes spectrales. La taille du champ de vue au sol est définie le long de la trace par le temps d'intégration nécessaire à l'obtention du bon rapport signal à bruit, de l'ordre de 1,4 s, ce qui correspond à 9 km à la vitesse orbitale et hors de la trace, donc en largeur, par le moyennage que l'on fera sur plusieurs pixels du détecteur, là encore pour atteindre le rapport signal à bruit nécessaire aux exigences de la mission. Dans le cas de MicroCarb, le meilleur compromis entre temps d'intégration, rapport signal à bruit et probabilité de nuage conduit à des champs de vue totaux de 13,5 km (*across track*) x 9 km (*along track*), découpés au sol en 3 mesures moyennes *across track* de 4,5 km.

Dans le spectrogramme mesuré, comme ce qui est recherché est au final la mesure de la profondeur des raies d'absorption par rapport au niveau de signal transmis appelé continuum, on comprend que le niveau de signal étant très faible en fond de raie, ce seuil de rapport signal à bruit est majeur. Pour aider à la mesure, une très bonne résolution spectrale aidera, si on peut attribuer plusieurs échantillons de mesures à chaque raie et donc disposer de mesures additionnelles des flancs de la raie. Les autres postes d'erreur principaux à maîtriser sont la non linéarité, qui impactera également les bas flux, la lumière parasite qui doit être proscrite pour éviter des signaux fantômes, ainsi que la réponse spectrale de l'optique de l'instrument qui doit être connue pixel par pixel de façon à savoir dans quelle mesure chaque longueur d'onde précise en entrée est étalée sur plusieurs pixels voisins du détecteur.

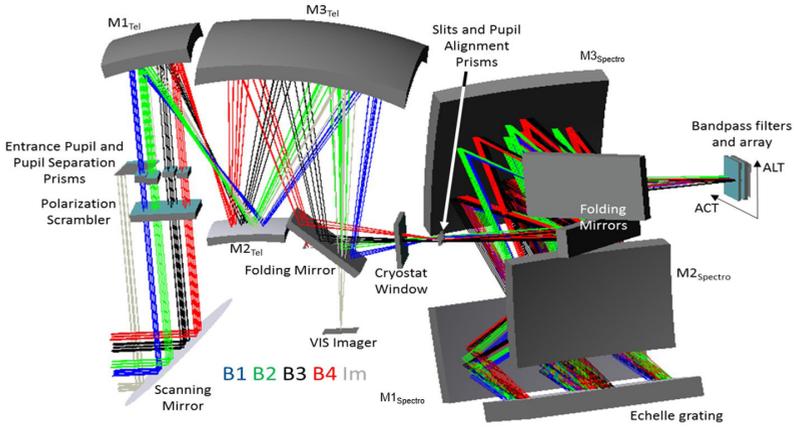


Figure 5 : *Design* de l'instrument (Source : Cnes).

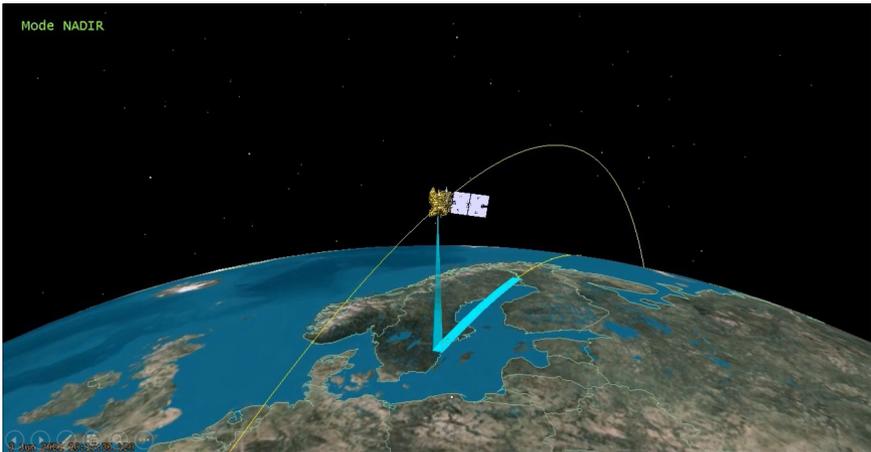


Figure 6 : Principaux modes de prise de vue de l'instrument : Nadir (terres émergées) et *Glint* (océans) (Source : Cnes).

Pour bien fonctionner, notamment dans l'infrarouge, le détecteur doit être refroidi à des températures de l'ordre de -110°C . L'emport d'une machine cryogénique étant difficile sur un microsatellite du fait de sa consommation électrique et des micro-vibrations générées, un système passif avec un radiateur collé au dos du détecteur, isolé du reste de l'instrument et protégé par un baffle empêchant toute entrée solaire ou liée à la Terre, lui a été préféré.

Les modes principaux d'observation sont le mode Nadir au-dessus des terres émergées (verticale locale), et *Glint* au-dessus des océans (le *Glint* est le reflet du Soleil vu par le satellite à la surface de la Terre, c'est cette direction qui est visée au-dessus des océans), ce qui est nécessaire car l'océan est trop sombre dans les longueurs d'onde observées en dehors de cette direction particulière. D'autre part, de nombreux modes de prise de vue sont utilisés pour étalonner l'instrument (étalonnages radiométrique, spectral, géométrique), par exemple en observant la Lune et le Soleil comme déjà évoqué. D'autres modes permettent une validation des concentrations de CO_2 issues des mesures MicroCarb par comparaison avec des mesures acquises au sol par des sites de référence vers lesquels le satellite est capable de pointer sa ligne de visée. Pendant la phase de calibration/validation, des lâchers de ballons instrumentés, qui fourniront un profil vertical du CO_2 atmosphérique jusqu'à une altitude de l'ordre de 35 km, seront réalisés de façon synchronisée avec les passages de MicroCarb à proximité des sites de largage (Aire-sur-Adour...).

Pour pointer l'instrument dans la direction voulue, le satellite pourra compter à la fois sur son agilité en tangage, roulis et lacet, mais aussi sur un miroir pivotant en entrée du chemin optique de l'instrument, qui accroît la dynamique de suivi de cibles en roulis (direction *across track*). Ces capacités seront mises à profit pour tester un mode probatoire d'évaluation des activités anthropiques au-dessus de villes comme Paris, en combinant des balayages en tangage successivement vers l'avant et l'arrière du satellite réalisés par le satellite et des décalages du miroir, de façon à agréger une surface englobant toute l'agglomération.

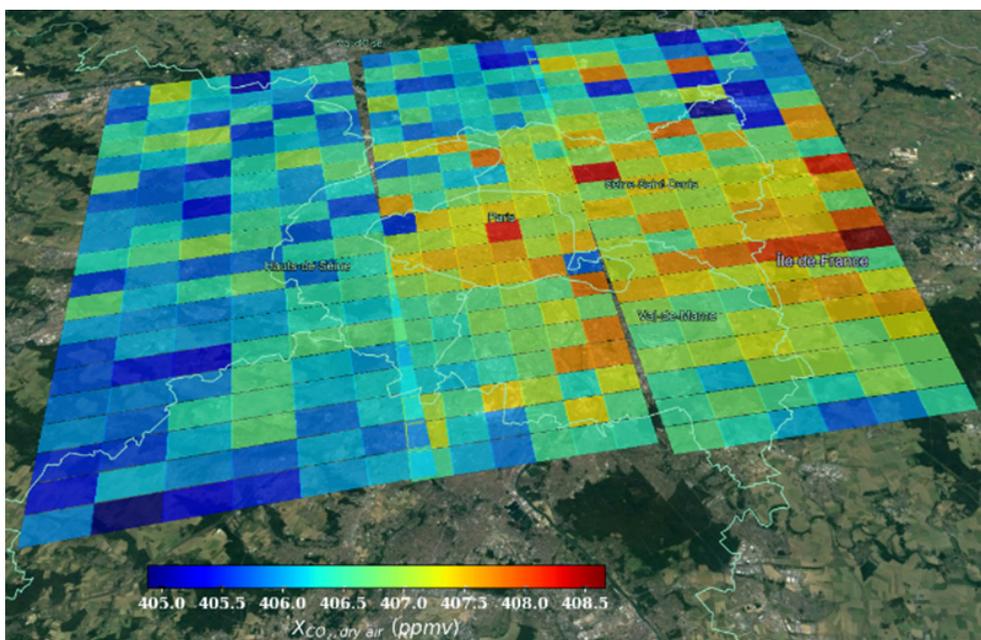


Figure 7 : Simulation du mode City MicroCarb sur Paris (Source : Cnes).

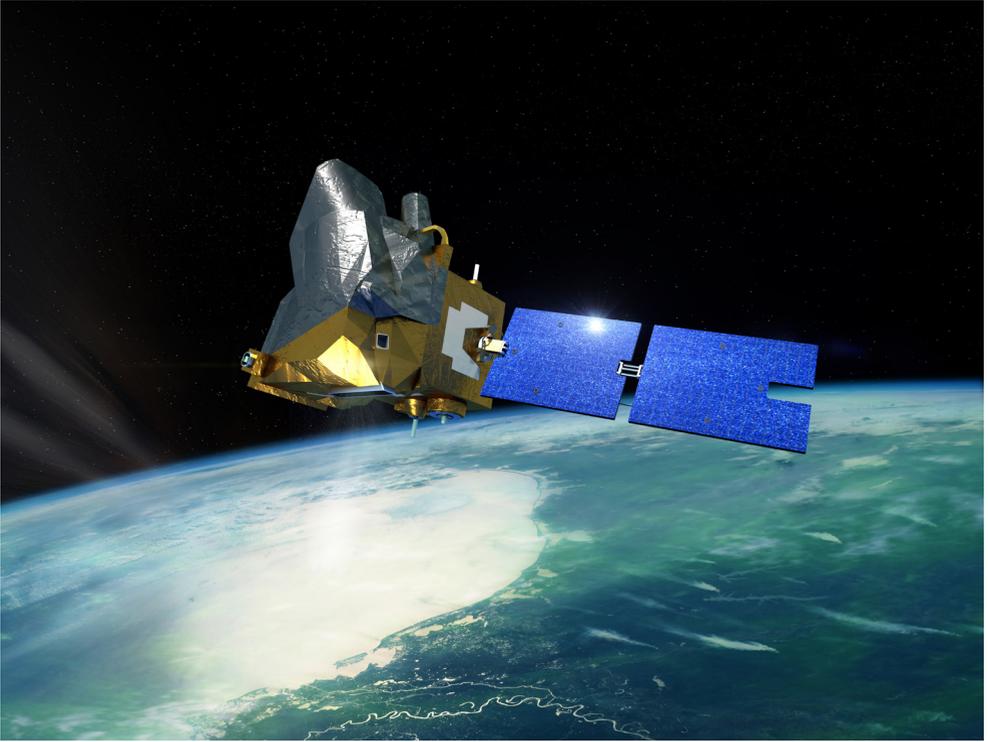


Figure 8 : Vue d'artiste du microsatellite MicroCarb (© Cnes/Sattler Oliver).



Figure 9 : Le microsatellite MicroCarb en intégration (© Cnes).

L'orbite du satellite est héliosynchrone, à 650 km d'altitude. Le caractère « héliosynchrone » est nécessaire pour rester proche de midi solaire, permettant alors un niveau de signal suffisant pour la mesure. Une orbite permet un échantillonnage des concentrations atmosphériques entre les deux pôles. Un peu moins de 15 rotations de la Terre sont réalisées chaque jour, répartissant les traces au sol d'acquisitions uniformément selon les longitudes. D'un jour à l'autre, le positionnement des traces au sol sur Terre évolue, ce qui permet une couverture complète du globe. L'orbite est choisie pour un cycle de 25 jours, période au bout de laquelle la trace au sol du satellite se superpose à celle du cycle précédent.

L'intégration du satellite s'est achevée en décembre 2023 et le lancement est espéré désormais en 2024, avec une incertitude liée à la disponibilité des lanceurs, perturbée en Europe par les échecs de ces dernières années sur le lanceur Vega.

LES TRAITEMENTS EN AVAL

Pour fixer des ordres de grandeur, l'amélioration de la connaissance des flux naturels du CO₂ nécessite une connaissance de la mesure à mieux que 0,2 ppm sur des moyennes spatiales (≈ 500 km) et temporelles (≈ hebdomadaires). Cet objectif est piloté par le besoin de suivi des flux naturels de carbone. Pour le suivi des émissions des villes ou des sites industriels, c'est plutôt l'erreur aléatoire (bruit spatial) qui est essentielle. Le panache issu des émissions d'une ville comme Paris est de l'ordre de 1 ppm (et varie en fonction des conditions atmosphériques) et l'erreur aléatoire doit donc être significativement inférieure à ce seuil.

L'ensemble de la télémessure scientifique du satellite sera dirigé vers un centre de mission apte à l'exploiter, à raison de l'ordre de 70 Go de données par jour, obtenus au travers de 6 passages journaliers en visibilité des stations de réception sol localisées pour certaines à hautes latitudes.

Il s'agit ensuite de traiter ces mesures par niveaux, tels que représentés sur la Figure 10 située page suivante : les données brutes sont décommutées et agrégées avec diverses données sol telles que la météo et la localisation fine du satellite pour constituer le produit de départ de niveau 0 (L0). Le passage au travers des paramètres de calibration de l'instrument permet ensuite de générer des niveaux L1, à savoir des spectrogrammes dans les 4 bandes spectrales, géo-référencés sur une grille, lorsque la mesure est considérée valide, notamment en fonction de la présence de nuages dans le champ de vue.

Puis vient le gros du traitement d'inversion de ces spectres pour remonter à la concentration de CO₂ par rapport à l'air sec (ou à l'O₂) en utilisant les 4 bandes spectrales, en utilisant un algorithme itératif apte à encaisser toutes les non linéarités du transfert radiatif atmosphérique. L'algorithme minimise une fonction de coût, qui porte sur la différence entre le spectre mesuré et corrigé au niveau 1, et un spectre calculé par l'algorithme de transfert radiatif appliqué à un vecteur d'état *a priori*. Il ajuste ainsi plusieurs paramètres (profils de CO₂, de vapeur d'eau, pression de surface, densité et altitude des aérosols...) de manière itérative. Les colonnes de CO₂ qui sont déduites de ce processus forment le cœur du produit dit de niveau 2.

Les produits de niveau 3 sont des moyennes spatiales et temporelles des produits de niveau 2. Leur utilité est essentiellement pour la validation (on vérifie qu'il n'y a pas de structures manifestement erronées) et la communication. Les produits de niveaux 4 sont les flux de surface déduits des colonnes de CO₂ et obtenus avec la connaissance du transport atmosphérique. Ils sont obtenus avec des outils dits d'inversion atmosphérique qui sont développés dans les laboratoires de recherche.

Lors de la première année en orbite, aura lieu la phase dite de CALVAL, visant dans un premier temps à affiner tous les traitements d'étalonnage des spectres et des images (niveau 1), puis mettre au point tous les traitements d'inversion des spectres (passage du niveau 1 au niveau 2). Pour cela, en premier lieu seront utilisés les modèles globaux disponibles, que MicroCarb cherchera ensuite à améliorer tout au long de sa mission en exploitation, prévue sur au moins 5 ans. Mais aussi toutes les mesures sol disponibles, qui pourront être densifiées voire même regroupées dans des campagnes multi-capteurs (stations sol, avions, ballons), telles que les campagnes MAGIC organisées régulièrement en France. Des inter-comparaisons avec d'autres satellites alors en vol seront aussi recherchées, grâce à des accords de coopération interagences (NASA, JAXA...).

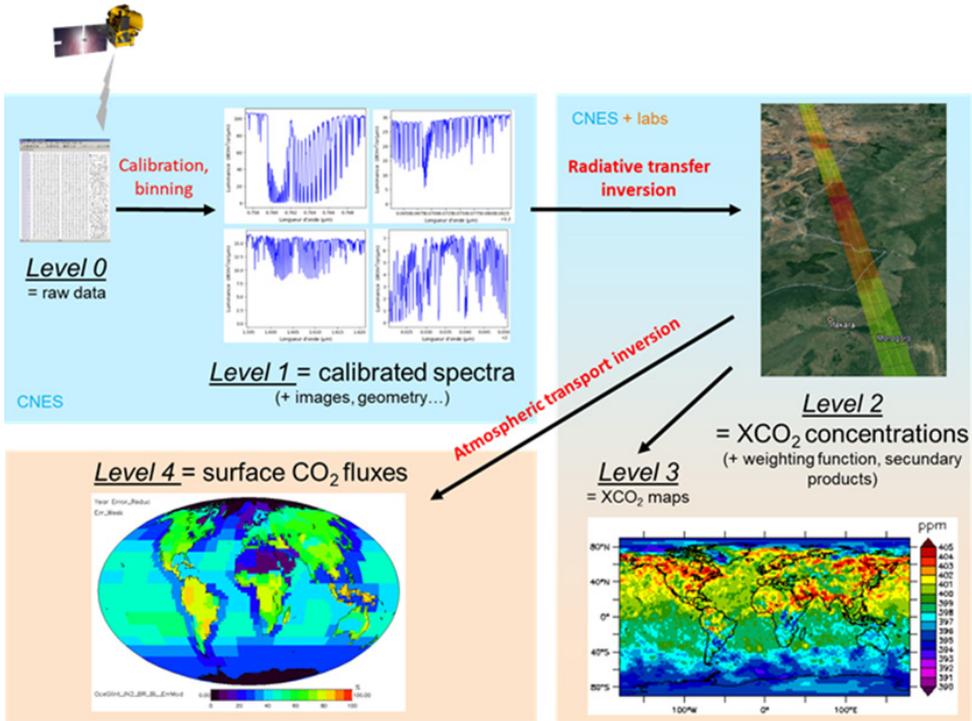


Figure 10 : Les niveaux de produit jusqu'à l'obtention de cartes globales de flux (Source : Cnes).

MUTUALISATION DES DONNÉES

Comme on l'a vu, la période de couverture globale de la Terre par MicroCarb sera de 25 jours. La proportion de scènes non nuageuses ne devrait être que de l'ordre de 25 % d'après les statistiques météorologiques. Pour de futurs systèmes opérationnels, il sera nécessaire d'observer les cibles d'intérêt le plus fréquemment possible afin d'une part de suivre les évolutions temporelles des émissions liées à la température (chauffage), au cycle hebdomadaire des émissions, ou à des événements particuliers (vacances, incidents industriels) mais aussi de compenser la couverture nuageuse. C'est pourquoi la mise en orbite d'une flotte de plusieurs satellites identiques est envisagée. Rien n'empêchera de compléter leurs mesures par des initiatives de nanosatellites, qui ne pourront cependant

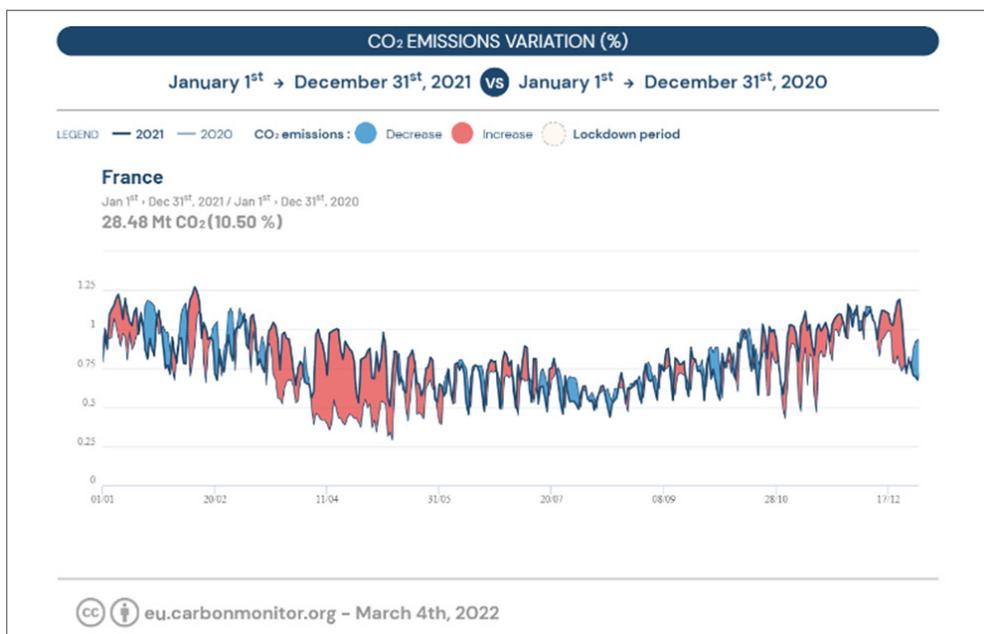


Figure 11 : Évolution des émissions en % de CO₂ entre 2020 et 2021 pour la France (Communication P. Ciais, LSCE et site Carbon monitor).

vraisemblablement apporter que des mesures partielles, avec par exemple uniquement la mesure des bandes CO₂ donc besoin de données exogènes pour en déduire les caractéristiques de la colonne d'air.

In fine, pour atteindre un objectif de disponibilité satisfaisant, les données collectées par MicroCarb puis ses successeurs, auront vocation à être assimilées avec non seulement les mesures au sol disponibles localement en continu, mais aussi d'autres approches basées sur la notion d'inventaire des consommations d'énergie ou de matières premières, pour tenter d'évaluer objectivement les émissions des États et assier les négociations suite aux accords de Paris. À titre d'illustration, le site Carbon monitor offre un tel outil de suivi des émissions par pays, ville ou zone géographique.

CONCLUSION

L'accroissement de la quantité des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et le réchauffement climatique qui en découle, renforcent la nécessité de mesure avec une bonne répétitivité spatiale et temporelle de la concentration de CO₂, en vue non seulement d'évaluer les effets liés aux activités anthropiques, mais surtout en premier lieu d'appréhender les mécanismes de circulation et d'échange du CO₂ entre l'atmosphère et les autres milieux et leurs évolutions en réaction au réchauffement global déjà observé.

Le domaine spatial est à même de fournir des systèmes permettant ce renforcement des capacités de mesure, au prix toutefois d'un investissement important pour venir à bout d'une physique de la mesure complexe, soumise à de nombreux postes d'erreur à maîtriser, non seulement au niveau des instruments mais aussi de la modélisation de l'atmosphère. MicroCarb, mission précurseur européenne apportera une première pierre à cet édifice dans la perspective de systèmes opérationnels futurs.

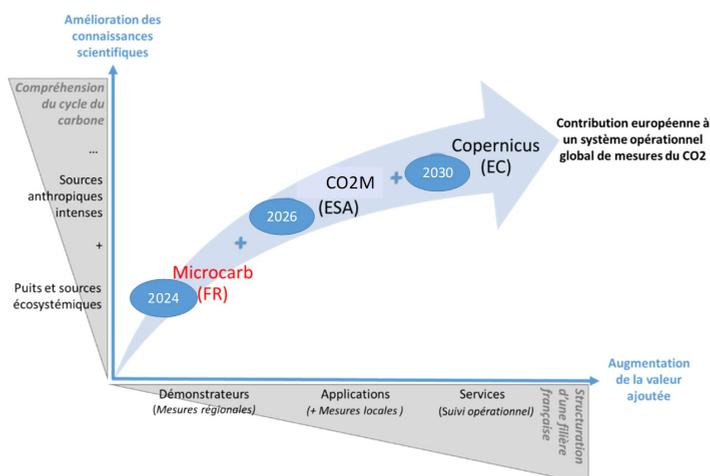


Figure 12 : Roadmap des missions CO₂ (Source : CEOS, Committee on Earth Observation Satellites).

BIBLIOGRAPHIE

CEOS (2014), “Strategy for carbon observations from space”, CEOS report April 2014.

IPCC (2013), “Fifth Assessment Report - Climate Change 2013”.

CEOS (2018), “Atmospheric Composition Virtual Constellation Greenhouse Gas Team. A constellation architecture for monitoring carbon dioxide and methane from space”, 8 October 2018.

GLOBAL CLIMATE OBSERVING SYSTEM (2011), “Systematic Observation requirements for satellite-based data products for climate”, GCOS-154, December 2011.

PASTERNAK F. *et al.* (2016), “The MicroCarb instrument”, International Conference on Space Optics, Biarritz France, 18-21 October 2016.

PASCAL V., BUIL C. *et al.* (2014), “An improved MicroCarb dispersive instrumental concept for the measurement of greenhouse gases concentration in the atmosphere”, International conference on Space Optics, Tenerife, Canary Island, Spain, 7-10 October 2014.

IBOS R., JAUBERT J., PRADINES D. & VARINOIS A. (2016), “MicroCarb Microsatellite: Mission and system analysis for pointing modes definition and constraints management”, International Conference on Space Optics, Biarritz France, 18-21 October 2016.

CNES, “Website Scientific missions”, <https://microcarb.cnes.fr/fr/MICROCARB/Fr/index.htm>

BÖSCH H. (2006), “Space based near infrared CO₂ measurements: testing the orbiting carbon observatory retrieval algorithm and validation concept using SCIAMACHY observations over Park Falls, Wisconsin”, *Journal of Geophysical Research atmospheres*, December 2006.

BUISSON F. (2019), “The MicroCarb Project: an initiative for a global monitoring of the CO₂ atmospheric concentration”, IAC-19-B1.2.3x48834.

JOUGLET D., BRÉON F. M. & LANDIECH P. (2023), “The MicroCarb CO₂ mission: status and technical insight”, IWGGMS-19.