

Composition atmosphérique :

que voir par spectroscopie infrarouge depuis l'espace ?

Cathy Clerbaux (cathy.clerbaux@latmos.ipsl.fr)

Laboratoire Atmosphères, Observations Spatiales (LATMOS), Institut Pierre-Simon Laplace
Sorbonne Université, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05

La mission IASI embarquée à bord des satellites Metop surveille l'atmosphère depuis dix-huit ans. À partir de l'analyse de millions de spectres atmosphériques enregistrés chaque jour, les concentrations des gaz peuvent être mesurées.

Les variations spatiales de ces concentrations nous permettent de suivre les événements exceptionnels (feux, volcans, pollution, catastrophes industrielles, etc.). Leurs variations temporelles nous renseignent sur l'évolution des gaz et des paramètres (températures, nuages, etc.) importants pour le suivi de la pollution et du climat.

La composition de l'air

La composition de l'air que nous respirons est bien connue : il s'agit essentiellement (99,03 %) d'azote et d'oxygène, avec un peu (0,93 %) d'argon. Ces gaz sont stables, de concentration constante, et ils sont transparents au rayonnement infrarouge thermique émis par la Terre. La capacité d'absorption d'un gaz est directement liée aux propriétés spectroscopiques des molécules qui le composent, à leur structure et, en particulier dans l'infrarouge, à leur capacité à « vibrer »^(a). Les molécules diatomiques comme le dioxygène (O_2) et le diazote (N_2) n'ayant pas cette capacité de vibration, elles n'absorbent donc pas le rayonnement infrarouge.

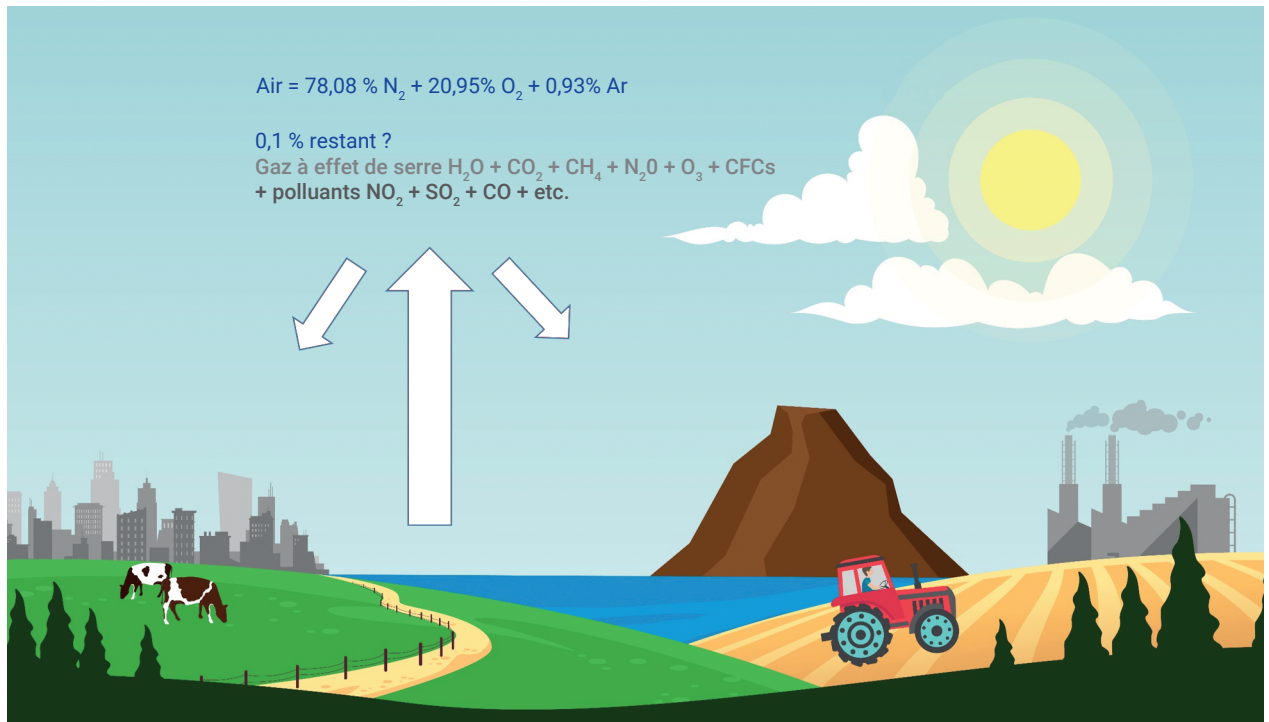
Le reste de l'atmosphère (~ 0,04 %) est composé de dizaines de gaz et aussi de particules, avec des concentrations faibles^(b), comme la vapeur d'eau (H_2O : 0 à 10 000 ppm), le dioxyde de

carbone (CO_2 : ~ 423 ppm), le méthane (CH_4 : ~ 1,9 ppm), les oxydes d'azote (N_2O : ~ 337 ppb, et NO_2 : 1 à 150 ppb), le dioxyde de soufre (SO_2 : 0 à 100 ppb), l'ozone (O_3 : 10 à 100 ppb près du sol et ~ 10 ppm à 30 km d'altitude), le monoxyde de carbone (CO : 50 à 1000 ppb), l'ammoniac (NH_3 : 0 à 500 ppt), les chlorofluorocarbures et leur substituts (CFCs, HCFCs, HFCs : 50 à 500 ppt), etc.

La composition exacte de l'air varie continuellement en fonction d'une multitude de facteurs naturels et environnementaux (fig. 1). Tous les gaz n'ont pas la même persistance dans l'atmosphère. Leur durée de vie dépend de leur capacité à réagir avec d'autres gaz (réactions chimiques), à être détruits par le rayonnement solaire (réactions photochimiques) ou à se redéposer sur le sol (dépôts secs ou humides). Certains gaz, très réactifs, sont détruits en quelques secondes ou

quelques minutes : même s'ils sont émis en concentration élevée, ils sont donc pour la plupart du temps invisibles depuis l'espace. D'autres gaz restent quelques heures ou quelques jours. Ils sont détectables par les satellites, mais uniquement à proximité immédiate de la source d'émission. Et, pour finir, certains gaz très stables, en particulier ceux à effet de serre, persistent dans l'atmosphère pendant plusieurs mois ou même plusieurs années, ce qui leur permet d'être transportés loin de leur source d'émission et de faire le tour de la Terre.

Les phénomènes d'origine naturelle (foudre, embruns marins, incendies, volcans) et d'origine humaine (trafic routier, industries, chauffage, feux de forêt, etc.) se combinent pour générer de l'ozone et d'autres polluants au niveau de la surface terrestre. Les gaz qui restent suffisamment longtemps



1. Les activités anthropiques ajoutent des gaz dans un système naturellement à l'équilibre. Les gaz minoritaires dans l'atmosphère jouent un rôle important, soit par leur capacité à piéger le rayonnement infrarouge (flèches en blanc), soit car ce sont des polluants qui ont un impact direct sur la santé.

dans l'atmosphère ont un impact global : ils piègent le rayonnement infrarouge et réchauffent la surface de la Terre. Des gaz comme le CO₂, le CH₄, le N₂O et les CFCs sont émis par les activités humaines et viennent s'ajouter aux concentrations naturelles de H₂O, CO₂, CH₄, N₂O et O₃ liées à l'activité géologique, aux phénomènes d'évaporation/condensation, et aux cycles biogéochimiques et photochimiques. Les gaz à effet de serre représentent donc une petite proportion de l'atmosphère, mais leur rôle est fondamental : ils contrôlent la température de la surface de la Terre et des basses couches de l'atmosphère, car ils absorbent et réémettent le rayonnement infrarouge. Cette étape a été essentielle pour l'émergence de la vie sur Terre : la présence des gaz à effet de serre a permis de maintenir une température globale moyenne de + 15 °C au lieu des - 18 °C qui prévaudraient sans notre atmosphère. Mais l'accumulation de ces gaz depuis la révolution industrielle, via l'utilisation de combustibles fossiles, perturbe l'équilibre initial et conduit à l'augmentation de température et aux perturbations climatiques observées aujourd'hui.

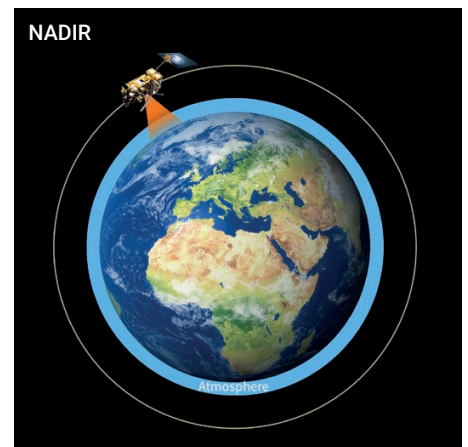
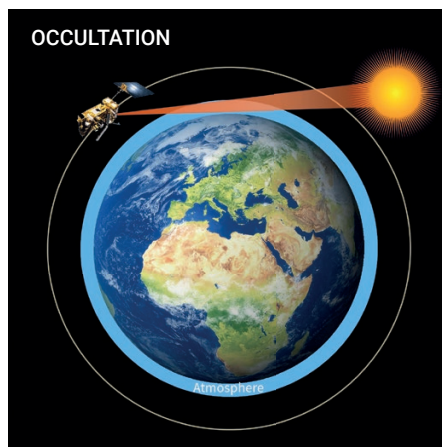
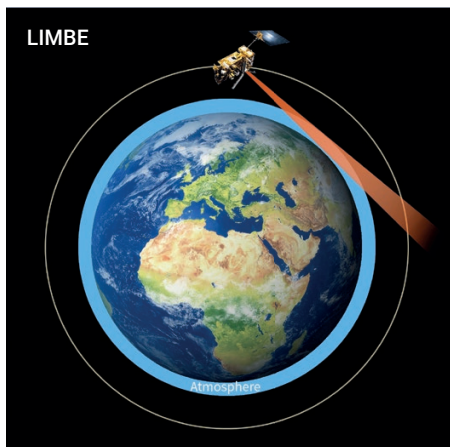
La surveillance des gaz depuis l'espace

Les premiers satellites d'observation de la Terre et de son atmosphère sont apparus dans les années 1960, motivés par le besoin de disposer de prévisions météorologiques plus précises. Aujourd'hui, de très nombreux instruments embarqués sur satellites sont en orbite autour de la Terre et apportent des informations essentielles sur la plupart des paramètres géophysiques nécessaires à la compréhension du système Terre-atmosphère. Ces observations satellitaires viennent compléter les mesures au sol (de routine ou ponctuelles lors de campagnes d'observations) et les observations réalisées à l'aide de dispositifs embarqués à bord de bateaux, ballons ou avions. Elles sont souvent moins précises qu'une mesure *in situ* mais offrent l'avantage d'une couverture spatiale inégalée et, dans de nombreux cas, une répétitivité temporelle très importante des observations. Malgré une résolution spatiale souvent limitée par rapport à des mesures plus ponctuelles et locales, les observations spatiales sont très utiles pour passer de l'échelle locale à l'échelle régionale

et fournir les « conditions aux limites » qui permettent de comprendre une mesure dans un contexte plus global. Par exemple, lors de l'étude d'un épisode de pollution, l'observation satellitaire permet de surveiller les sources impliquées et le déplacement des panaches de pollution.

Pour mettre au point un sondeur atmosphérique, il faut un instrument qui puisse fournir des observations à partir desquelles les variables géophysiques nécessaires seront déterminées par télédétection. Il s'agit tout d'abord de choisir la gamme de longueur d'onde qui convient, le type d'instrument, ses performances radiométriques, etc. Lors de cette étape, de nombreuses itérations sont nécessaires afin de ne pas définir un instrument trop lourd, trop compliqué ou trop cher, mais qui permette néanmoins d'atteindre la précision souhaitée. Le choix de l'orbite est également important : les orbites basses autour de 600-800 km assurent une couverture géographique globale (orbite polaire) ou centrée sur une bande de latitude donnée, tandis que l'orbite géostationnaire, vers 36 000 km d'altitude, permet d'observer toujours la même partie du globe avec une

>>>



2. Trois géométries d'observation utilisées pour le sondage atmosphérique.

(a) Le sondage au limbe qui utilise comme source le rayonnement thermique et micro-onde émis par l'atmosphère ou qui mesure le rayonnement UV-visible diffusé par la surface terrestre et l'atmosphère ; (b) le sondage au limbe en occultation solaire qui vise le Soleil ou la Lune ou une étoile comme source de rayonnement ; et (c) le sondage au nadir qui pointe vers la surface terrestre et permet de sonder les plus basses couches de l'atmosphère.

>>>

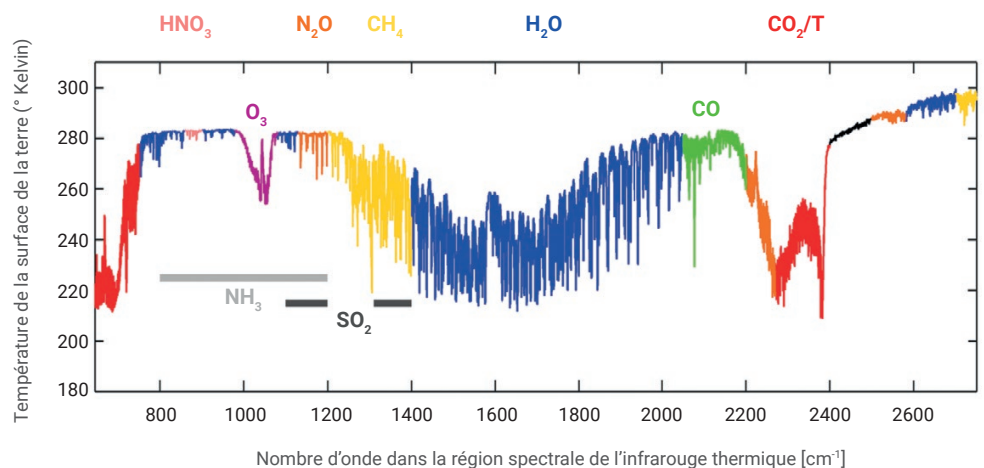
fréquence d'observation plus élevée. Dans le cas du sondage de l'atmosphère, trois géométries d'observation sont possibles (fig. 2) : les sondages au limbe (soit qui visent l'atmosphère, soit en occultation solaire) qui permettent de sonder la partie supérieure de l'atmosphère avec une résolution verticale fine, et les sondages au nadir^(c) qui permettent de sonder la troposphère jusqu'à la surface terrestre, avec une résolution verticale modérée.

Les sondeurs et imageurs dits « passifs » mesurent le rayonnement solaire réfléchi ou le rayonnement thermique émis par la surface terrestre et l'atmosphère dans diverses longueurs d'onde (ultraviolet, visible, infrarouge et micro-onde). Les instruments dits « actifs » émettent un rayonnement et mesurent la quantité restituée après réflexion et diffusion dans l'atmosphère et/ou à la surface terrestre. La résolution verticale est supérieure dans le cas des instruments actifs et en ciel clair. La trace au sol^(d) des instruments actifs est souvent limitée à quelques centaines de mètres, alors que celle des instruments passifs est de l'ordre de 5 à 20 kilomètres.

Le sondeur infrarouge IASI

La mission française IASI^(e) surveille la composition de l'atmosphère en continu depuis octobre 2006 à bord des satellites européens Metop, en utilisant les propriétés spectroscopiques des molécules qui absorbent le rayonnement infrarouge thermique émis par la Terre. Les satellites météorologiques Metop gravitent sur une orbite polaire, à environ 800 km d'altitude, et effectuent un balayage en zigzag perpendiculairement à la trace au sol (sur une distance de 1100 km de part et d'autre), afin de couvrir tous les points du globe chaque matin et chaque soir vers 9 h 30, heure locale.

Le cœur de l'instrument IASI est un spectromètre à transformée de Fourier qui enregistre le rayonnement infrarouge (de longueur d'onde 3,7 à 15,5 μm) émis par la Terre et qui traverse l'atmosphère. Le signal fourni est un spectre (fig. 3), qui contient les signatures en émission et en absorption des molécules qui se trouvent le long du trajet optique entre la surface de la Terre et le détecteur. Si le ciel est clair, l'analyse du signal reçu fournit une information sur les concentrations des gaz à l'endroit de la mesure. Si le ciel est nuageux, l'observation n'est possible qu'au-dessus du nuage. Les spectres sont obtenus avec une qualité radiométrique élevée et avec une résolution spectrale suffisante pour



3. Spectre atmosphérique, obtenu en divisant la mesure IASI par la courbe d'émission du corps noir terrestre (qui est directement liée à la température de surface de la Terre), dans la région spectrale de l'infrarouge thermique. Chaque molécule de gaz a une signature qui lui est propre. L'axe horizontal est la gamme de nombres d'onde ($1/\lambda$) couverte par les détecteurs de IASI, en cm^{-1} . L'axe vertical indique la température de brillance et, quand rien n'absorbe, il s'agit de la température de surface terrestre à l'endroit de la mesure (ici environ 280 K). Les concentrations des gaz peuvent être déduites à partir de leurs raies d'absorption, dont les intensités sont directement proportionnelles à la température à l'endroit de l'observation et à la concentration du gaz. Étant donnée la concentration atmosphérique constante du CO_2 , ses bandes d'absorption permettent de mesurer le profil de température.

pouvoir distinguer les gaz qui absorbent, grâce à leur signature spectroscopique unique.

L'analyse de ces spectres atmosphériques permet d'en déduire des concentrations sous forme de colonnes totales (c'est-à-dire la concentration du gaz intégrée depuis le sol jusqu'à l'altitude de sensibilité de l'instrument) ou de profils de concentration. L'instrument permet une surveillance continue de la composition atmosphérique, avec une couverture globale deux fois par jour. Les passages successifs du satellite permettent de surveiller depuis l'espace les gaz qui s'accumulent et se déplacent autour du globe.

Chaque instrument IASI fournit plus d'un million d'observations (spectres atmosphériques) chaque jour (jusqu'en 2021 il y avait trois instruments IASI en opération, il en reste deux actuellement). Les chercheurs disposent maintenant d'une base de données colossale, qui permet de suivre quotidiennement une série de gaz qui absorbent tous dans l'infrarouge. À ce jour, les observations IASI ont permis de mesurer les concentrations de 33 molécules différentes ; les grosses particules comme les cendres volcaniques ou le sable peuvent aussi être détectées. Tous les gaz ne sont pas présents partout et tout le temps ; les gaz à effet de serre, qui ont un long temps de vie, sont visibles dans chaque observation, mais restent difficiles à mesurer, vu que leurs variations sont faibles par rapport à un signal de fond qui est important. À l'inverse, les gaz qui ont un temps de vie plus court présentent des variations spatiales et temporelles importantes, et ne sont parfois visibles que près des sources d'émission.

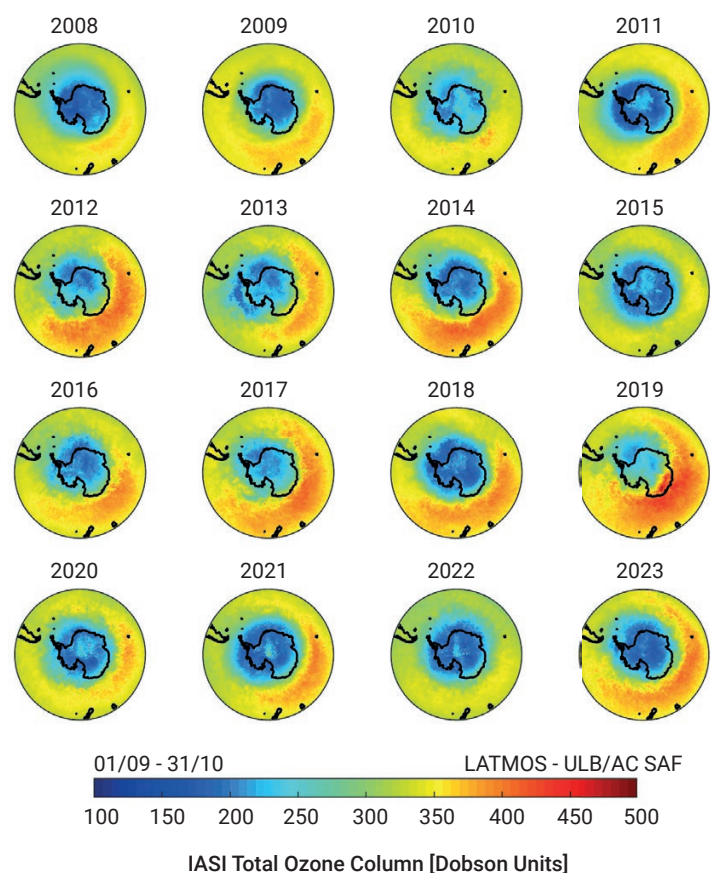
Pour déterminer les concentrations des gaz en temps réel, des algorithmes sophistiqués et rapides, basés soit sur l'interpolation optimale (pour déterminer les profils de concentrations) soit sur des réseaux de neurones (pour déterminer des colonnes totales) ont été développés. Quatre exemples de ce que l'instrument permet de faire sont décrits ci-après : la surveillance du trou d'ozone, la détection de l'ammoniac pour mieux prévoir les pics de pollution, et le suivi d'événements exceptionnels comme les éruptions volcaniques et les grands feux.

La surveillance du trou d'ozone

L'ozone nous protège du rayonnement solaire, en absorbant les rayons ultraviolets les plus énergétiques dans les hautes couches de l'atmosphère (entre 10 et 50 kilomètres). Sans ozone, pas de vie telle qu'on la connaît sur Terre. Les processus chimiques simples qui produisent et détruisent ce composé atmosphérique qui remplit la stratosphère sont connus depuis longtemps, mais c'est seulement depuis la fin des années 1980 que le phénomène de destruction massive d'ozone au-dessus du continent Antarctique a été observé et compris. En effet, les chercheurs ont fait le lien avec les émissions de halons^(f) et de chlorofluorocarbures (CFCs), qui, en se dégradant dans les hautes couches de l'atmosphère, génèrent les composés chlorés qui conduisent à la destruction catalytique de l'ozone à la fin de l'hiver polaire (en septembre-octobre chaque année). Ce phénomène

peut aussi se produire ponctuellement au Pôle Nord, mais c'est relativement rare car le processus de destruction massive n'est enclenché que quand les températures sont suffisamment froides pour que des nuages stratosphériques polaires se forment à hautes altitudes. Ceci est plus rare au-dessus de l'Arctique, car l'absence de continent sous la glace rend la dynamique atmosphérique moins stable et les conditions ne sont pas souvent réunies pour qu'un vortex polaire se forme durant l'hiver.

Depuis que différents protocoles internationaux ont été mis en place, les émissions de CFCs sont complètement interdites. Comme ces gaz persistent pendant plusieurs dizaines d'années dans l'atmosphère, leurs concentrations baissent lentement. Différents instruments basés au sol ou embarqués surveillent l'évolution de la concentration en ozone, en particulier au-dessus des deux pôles. IASI fait partie de ces instruments (voir un exemple de mesures sur la figure 4), avec un



4. Les concentrations d'ozone (colonnes totales intégrées sur la verticale) mesurées par IASI au-dessus de l'Antarctique en septembre-octobre, de 2008 à 2023. Le terme « trou d'ozone » est utilisé quand les valeurs mesurées sont inférieures à 220 unités Dobson (en bleu)⁽⁹⁾.

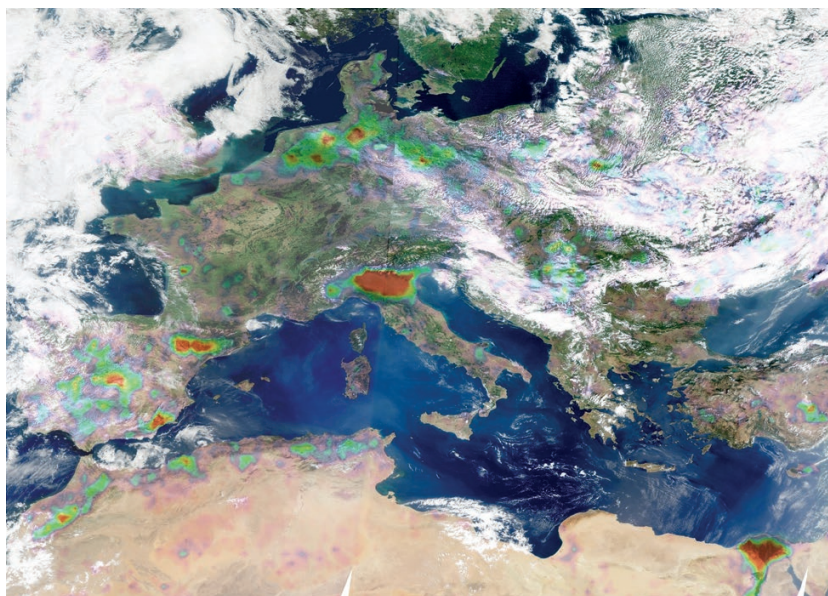
>>>

atout en plus : il peut voir durant la nuit polaire.

La détection de l'ammoniac (NH_3), précurseur de particules

L'ammoniac atmosphérique est un composé important puisqu'il se dégrade en particules fines sous forme de sels d'ammonium, altérant la qualité de l'air que nous respirons. Il est principalement présent dans les zones d'élevage ou d'agriculture intensive, ou au-dessus des complexes industriels de fabrication d'engrais. Mais les processus régulant les concentrations de ce gaz dans l'atmosphère sont très mal connus, particulièrement à l'échelle locale. La possibilité de détecter l'ammoniac depuis l'espace a été une surprise, étant donné son temps de vie réduit (quelques heures). Comme l'instrument IASI bénéficie d'un excellent rapport signal-sur-bruit dans la région spectrale d'absorption du NH_3 , les premières cartes de la distribution d'ammoniac à l'échelle du globe ont pu être obtenues dès 2009.

Dix ans plus tard, en exploitant les données journalières de NH_3 mesurées par l'instrument pendant cette période, une carte mondiale de la répartition d'ammoniac atmosphérique, au kilomètre carré près, a pu être générée. En combinant cette carte avec des images satellites, 241 sources localisées de NH_3 liées à l'activité humaine ont pu être identifiées, dont 83 sont associées à l'agriculture intensive et 158 à l'activité industrielle, ainsi que 178 zones d'émissions plus étendues (voir la figure 5 pour l'Europe). En plus des nouvelles sources répertoriées et donc absentes des inventaires précédents, ces travaux ont montré que les émissions provenant de sources connues sont très largement sous-estimées. L'évolution des concentrations d'ammoniac a également permis d'identifier des changements dans les activités humaines, comme l'ouverture ou la fermeture de complexes industriels ou encore l'agrandissement d'infrastructures d'élevage intensif.



© L. Clarisse (ULB)

5. Mesures par l'instrument IASI de la concentration atmosphérique d'ammoniac (NH_3) en Europe en 2008. L'image de fond a été enregistrée par l'instrument MODIS^(h). En blanc on voit les nuages, en rouge les endroits où des concentrations importantes d'ammoniac sont mesurées.

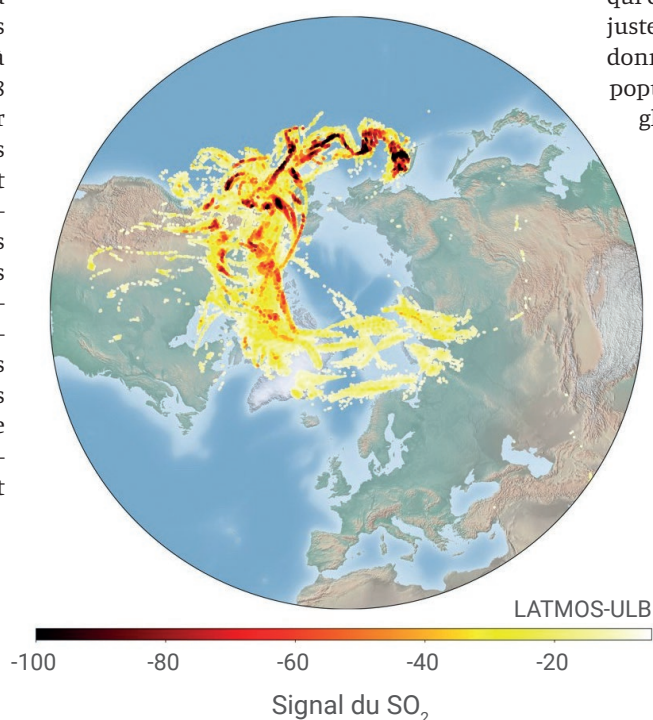
La détection de dioxyde de soufre (SO_2) pour suivre les éruptions volcaniques

Depuis plusieurs années, des systèmes de suivi des éruptions volcaniques ont été mis au point afin de permettre une alerte rapide aux avions qui sont amenés à croiser les panaches d'éruptions volcaniques. La communauté s'est organisée : le globe terrestre a été divisé en neuf zones, dont

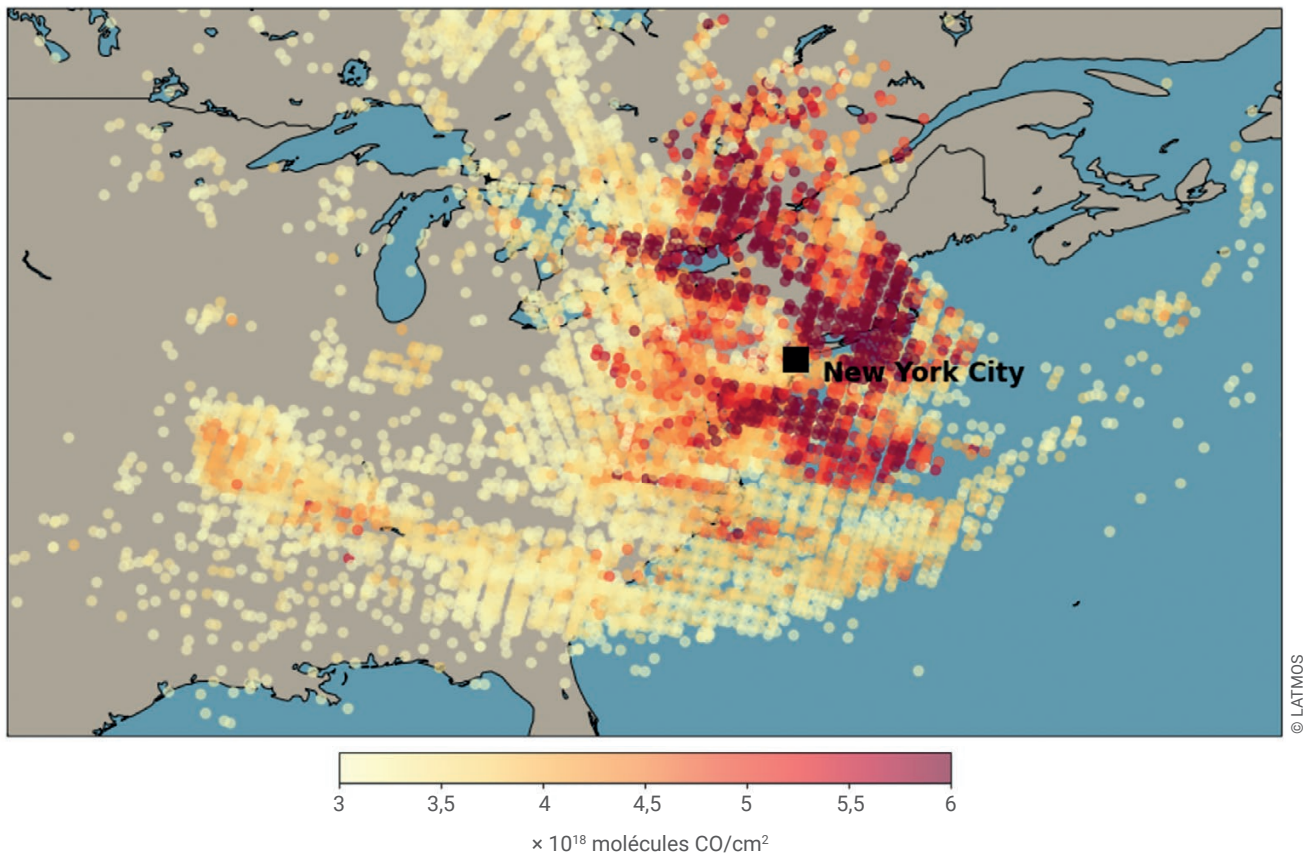
la surveillance est placée sous la responsabilité des VAAC (*Volcanic Ash Advisory Centers*). À l'intérieur de leurs zones de responsabilité, les centres de surveillance doivent localiser et prévoir le déplacement, pendant les heures qui suivent l'éruption, des nuages de cendres volcaniques.

IASI permet la détection des éruptions et la caractérisation des panaches volcaniques sur la base des signatures d'absorption associées au SO_2 (fig. 6), qui est émis en cas d'éruption (parfois juste avant aussi, ce qui permet de donner des alertes d'évacuation des populations). La couverture spatiale globale permet de suivre l'évolution du panache et de sa composition dans le temps et dans l'espace.

Un système d'alerte a été mis en place, qui avertit automatiquement les pilotes des avions pour éviter qu'ils croisent les panaches qui endommageraient les moteurs ou les hélices.



6. Mesures par l'instrument IASI de la concentration atmosphérique de dioxyde de soufre SO_2 dans l'hémisphère nord entre le 9 et le 23 avril 2023, suite à l'éruption du volcan Shiveluch dans la péninsule du Kamchatka.



7. Mesure par l'instrument IASI de la concentration de monoxyde de carbone CO, qui illustre le transport de fumée depuis le Canada pendant l'été 2023, affectant la qualité de l'air dans les grandes villes de la côte Est des États-Unis.

La détection du monoxyde de carbone (CO) pour suivre les fumées des feux

Quand la végétation brûle, il s'en dégage des particules (suie de carbone) mais aussi un cocktail de gaz toxiques qui peut varier en fonction du type de végétation brûlée (forêt, savane, toundra, broussailles, etc.). Ces fumées, composées de gaz et de particules, se déplacent ensuite au gré des vents, plus ou moins loin selon leur persistance dans l'atmosphère et leur altitude d'injection. Outre les particules qui affectent directement la qualité de l'air, les panaches de fumées sont principalement composés de CO₂ et de CO, deux gaz liés à la combustion. Le meilleur traceur pour suivre le déplacement des fumées des grands feux est le monoxyde de carbone CO, qui résulte de la combustion incomplète, phénomène bien connu comme un tueur domestique silencieux dans le cas des chauffe-eaux et des poêles à bois domestiques mal réglés. Ce gaz, invisible à l'œil nu,

inodore et incolore, peut être traqué par les satellites infrarouges comme IASI.

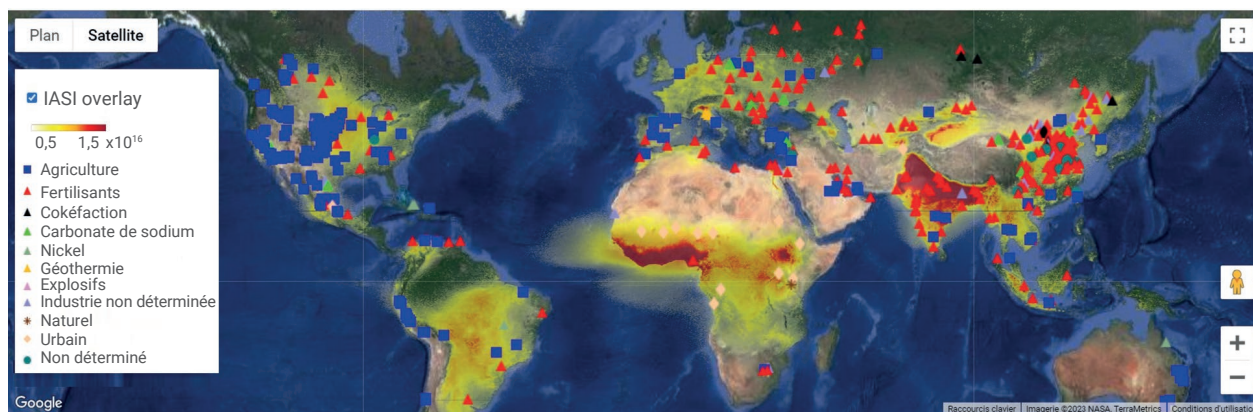
Sur les cartes journalières de concentration du CO mesurées par IASI, on peut observer les feux récurrents dans les régions qui pratiquent l'agriculture sur brûlis, en particulier en Afrique et en Indonésie, ainsi que les fumées consécutives aux feux dévastateurs qui ont eu lieu chaque été dans les régions boréales (fig. 7), et en Amazonie entre août et octobre. Le monoxyde de carbone CO est un excellent traceur de la pollution, car il peut être transporté sur des distances atteignant plusieurs milliers de kilomètres, étant donnée sa durée de vie de plusieurs semaines. Selon les vents dominants, faire le tour de la Terre lui prend entre deux et quatre semaines.

Conclusion : accès aux données et futur

IASI est un sondeur passif qui enregistre des spectres atmosphériques au nadir, à partir desquels les concentrations des gaz peuvent être

>>>

“ Les milliards d'observations [de IASI] permettent de générer des cartes globales [...] pour surveiller la composition atmosphérique et ses changements (dans l'espace et dans le temps), localement et à grande échelle.”



8. Visualisation des sources d'ammoniac sur une carte Google Earth, obtenue à partir des observations par les instruments IASI, moyennées sur dix ans. <https://squares.ulb.be/NH3-IASI.html>

>>>

mesurées. Ces milliards d'observations permettent de générer des cartes globales deux fois par jour, pour surveiller la composition atmosphérique et ses changements (dans l'espace et dans le temps), localement et à grande échelle.

Toutes les données présentées dans cet article sont disponibles pour la communauté scientifique, via le portail d'accès IASI sur la base de données AERIS (iasi.aeris-data.fr/). Des « coups d'œil » rapides permettent de visualiser les données pour chaque jour, et un calendrier permet de choisir les périodes à télécharger. À noter que ces données sont aussi utilisées de manière opérationnelle pour surveiller la

diminution de l'ozone en Antarctique (projet C3S), pour éviter que les avions de ligne ne croisent les panaches d'éruptions volcaniques (SO₂ et cendres, projet SACS sacs.aeronomie.be/), pour suivre la pollution à grande échelle (assimilation du CO IASI dans le projet Copernicus CAMS), et pour identifier les sources principales d'ammoniac (NH₃-IASI.html) (fig. 8).

Dans le futur, une nouvelle mission (IASI-NG pour IASI nouvelle génération) prendra le relais et sera lancée sur les trois satellites Metop-SG (Metop seconde génération). Le futur instrument est un bijou de technologie, qui utilise le même principe de sondage

atmosphérique que IASI, mais avec une résolution spectrale et un rapport signal-sur-bruit deux fois meilleurs. Ces caractéristiques instrumentales lui permettront d'obtenir une meilleure résolution verticale pour le monoxyde de carbone et l'ozone (qui ont une signature spectrale importante) et aussi de mesurer plus précisément les gaz qui absorbent faiblement, comme l'ammoniac et le dioxyde de soufre. Le premier lancement de IASI-NG est prévu pour 2025, mais des incertitudes demeurent étant donné le contexte géopolitique... En effet, les deux IASI qui volent encore actuellement ont été mis en orbite par le lanceur russe Soyouz. ■

0
9
0

1• C. Clerbaux *et al.*, "Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/Metop sounder", *Atmospheric Chemistry and Physics*, **9** (2009) 6041-6054. DOI: 10.5194/acp-9-6041-2009. <https://cutt.ly/copernicus-articles>

2• C. Clerbaux, "How science saved the ozone layer", *The Conversation France*, 29 novembre 2023. <https://cutt.ly/science-saved-ozone-layer>

3• M. Van Damme *et al.*, "Industrial and agricultural ammonia point sources exposed", *Nature*, **564** (2018) 99-103. DOI: 10.1038/s41586-018-0747-1, 2018. <https://cutt.ly/nature-article>

4• C. Clerbaux *et al.*, "Mesure du SO₂ et des cendres volcaniques avec IASI", *La Météorologie*, **74** (2011) 35-41. DOI: 10.4267/2042/43879, 2011. <https://cutt.ly/meteorologie-issues>

5• X. Ceamanos *et al.*, "Remote sensing and model analysis of biomass burning smoke transported across the Atlantic during the 2020 Western US wildfire season", *Scientific Reports*, **13** (2023) 16014. <https://cutt.ly/nature-article-2>

(a) Les transitions impliquant des changements dans les états vibrationnels et rotationnels des molécules peuvent être regroupées sous le terme de « transitions rovibrationnelles ». La spectroscopie rovibrationnelle est une branche de la spectroscopie moléculaire qui s'intéresse aux spectres infrarouges des molécules en phase gazeuse. Lorsque ces transitions émettent ou absorbent des photons, la fréquence est proportionnelle à la différence entre les niveaux d'énergie et peut être mesurée par télédétection.

(b) Pour mesurer les concentrations des gaz minoritaires, les unités suivantes sont utilisées : une partie par million (1 ppm) = une molécule sur un million d'autres molécules ; 1 ppb = 1/10⁹ autres molécules ; 1 ppt = 1/10¹² autres molécules.

(c) Nadir : point du ciel à la verticale de l'observateur vers le bas (opposé à zénith).

(d) La trace au sol est la trajectoire que suit un satellite lorsqu'on projette sa position sur le sol terrestre.

(e) Développé par le CNES en coopération avec EUMETSAT, l'instrument IASI (Interféromètre atmosphérique de sondage dans l'infrarouge) équipe les satellites météorologiques européens Metop lancés en 2006, 2012 et 2018 par Eumetsat. Outre les profils de température avec une précision de 1°C et d'humidité de l'atmosphère avec une précision de 10 % pour une couche de 1 km d'épaisseur, IASI mesure plus de 30 composants atmosphériques avec une très grande précision et participe à la surveillance du climat.

(f) Halons : hydrocarbures, dont un ou plusieurs atomes d'hydrogène sont substitués par des atomes d'halogènes (fluor, chlore ou brome), et qui étaient utilisés comme réfrigérant ou comme liquide extincteur.

(g) Une unité Dobson correspond à une couche d'ozone qui aurait une épaisseur de 10 µm dans les conditions normales de température et de pression.

(h) MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectrometer) est une série d'instruments scientifiques lancés par la NASA à bord des satellites Terra puis Aqua, qui prennent une image complète de la Terre tous les un ou deux jours avec une résolution spatiale de 250 m à 1 km.