Zoom sur la qualité de l'air dans le monde avec TROPOMI

Michel Van Roozendael

Introduction

Copernicus est le programme européen de surveillance de la Terre. Il s'intéresse à notre planète et à son environnement en offrant, au bénéfice de tous les citoyens européens, des services d'information basés sur l'observation de la Terre par satellite et à partir de réseaux de mesure au sol. Grâce à Copernicus, la Commission Européenne a mis sur pied un ensemble de satellites appelés 'Sentinelles' conçus pour scruter la Terre afin de fournir des données essentielles sur le climat, l'exploitation des sols, les ressources naturelles, la hauteur des océans et des glaces, etc. L'Agence Spatiale Européenne (ESA) est chargée de bâtir le segment spatial en support des six services Copernicus concernant respectivement les milieux atmosphérique, marin et terrestre ainsi que le changement climatique, la sécurité et la gestion des urgences.

Lancé le 13 octobre 2017 sur une orbite polaire héliosynchrone, le satellite Sentinel-5 Precursor est la première mission Sentinelle dédiée à l'observation de la pollution de notre atmosphère. Comme son nom l'indique, Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P) est le précurseur des trois satellites de composition atmosphérique Sentinel-5 qui seront lancés à l'horizon 2021-2035, assurant la continuité de la surveillance globale de l'atmosphère jusqu'en 2042. Grâce à son instrument TROPOMI, le spectromètre d'imagerie multi-spectrale le plus sophistiqué à ce jour, Sentinel-5P fournit des données sur la composition de l'atmosphère avec un niveau de détail et de précision jamais atteint.

Avec ses canaux dans l'ultraviolet, le visible et l'infrarouge proche, TROPOMI mesure l'abondance de plusieurs constituants clés de la pollution atmosphérique tels que l'ozone (O_3), le dioxyde d'azote (NO_2), le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de soufre (SO_2), le méthane (CH_4), le formaldéhyde (HCHO) ainsi que les aérosols et les nuages. Au côté de différents partenaires européens impliqués depuis le début de la mission en 2009, l'IASB a joué un rôle important dans le développement des algorithmes de restitution des molécules SO_2, HCHO et ozone. Il occupe également une place centrale dans le programme de validation de la mission et contribue à l'analyse scientifique des données, notamment à l'aide de modèles mathématiques de l'atmosphère. Au total, la mission Sentinel-5P mobilise environ 20 personnes à l'IASB. Cet article illustre par le biais de quelques exemples l'apport principal de la mission et la contribution belge.

Objectif de la mission

Selon un rapport récent de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), chaque année la pollution de l'air est responsable du décès de 400 000 personnes en Europe et 7 millions dans le monde, dû à l'inhalation d'un air trop chargé en particule fine et/ou d'autres espèces polluantes. C'est davantage que les morts cumulés du sida (1,1 million), de la tuberculose (1,4 million), du diabète (1,6 million) et des accidents de la route (1,3 million). L'OMS reconnait également que la pollution de l'air représente un facteur de risque à l'origine de maladies non-transmissibles, telles que le cancer du poumon, l'accident vasculaire cérébral ou encore l'infarctus. La mission Sentinel-5P participe à une stratégie globale de mitigation des risques associés à la pollution de l'air et au changement climatique, sachant que les deux problématiques sont intimement liées. Son objectif principal est de fournir une cartographie globale de l'état de la pollution et de son évolution, et de contribuer à un système d'observation intégré combinant mesures sol, mesures satellitaires et modélisation, tel que développé au sein du Service de surveillance de l'atmosphère du programme Copernicus (CAMS) (voir https://atmosphere.copernicus.eu).

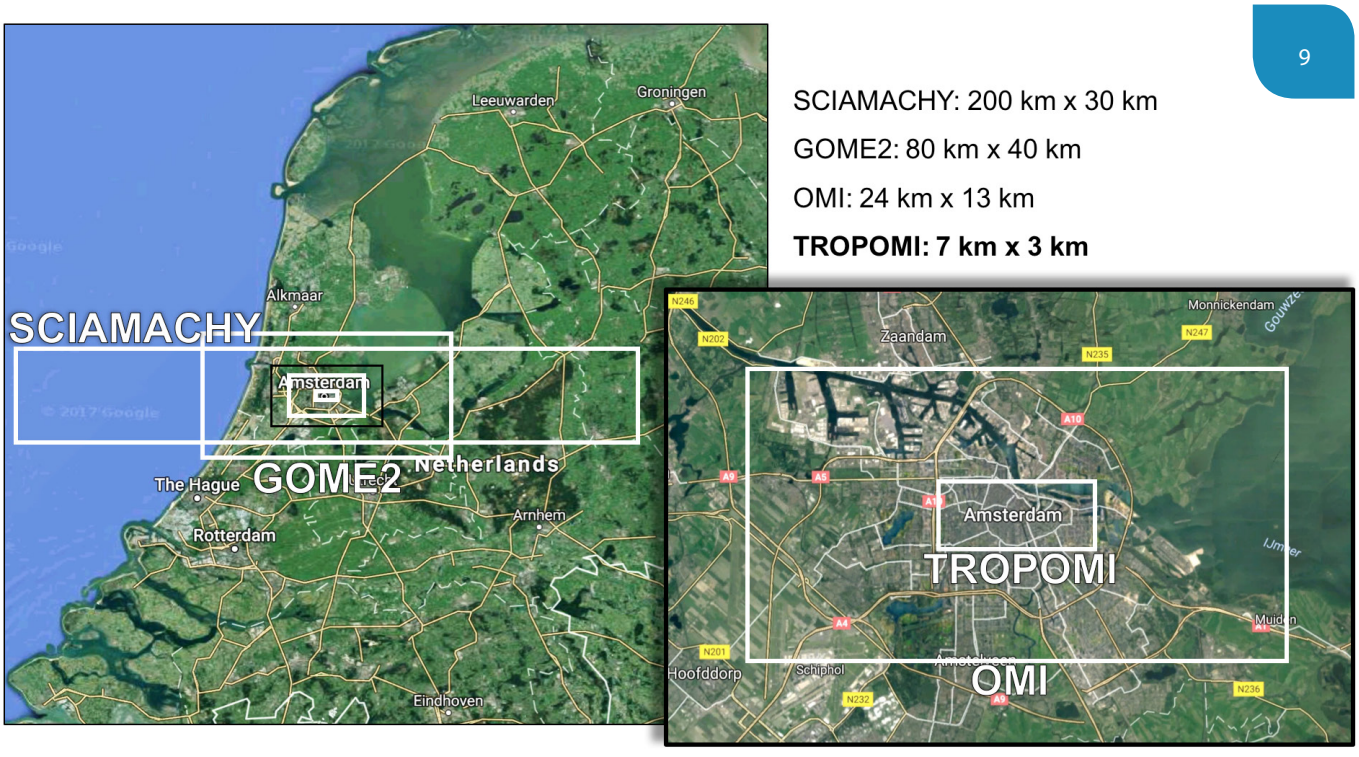

Figure 1: Délimitation approximative d'un pixel au sol des instruments satellitaires SCIAMACHY, GOME-2, OMI et TROPOMI. La région illustrée couvre les Pays-Bas et est centrée sur la ville d'Amsterdam. Le gain de résolution apporté par TROPOMI est spectaculaire et permet, pour la première fois, la mesure de polluants troposphériques à l'échelle sub-urbaine. © KNMI

L'instrument TROPOMI

Sentinel-5P embarque à son bord un instrument unique - TROPOMI (pour 'Tropospheric Monitoring Instrument') - développé par plusieurs instituts de recherche hollandais en particulier l'Institut royal météorologique des Pays-Bas (KNMI), le centre de recherche spatiale hollandais (SRON) et le centre de recherche appliquée (TNO). D'une masse totale de 220 kg, il se compose de deux spectromètres à réseau imageurs dans une configuration 'en peigne' (pushbroom en anglais) couvrant une bande spectrale allant de l'ultraviolet à la lumière visible et deux canaux dans l'infrarouge proche. Ces bandes ont été sélectionnées pour optimiser la détection des différentes espèces chimiques recherchées. La fauchée a une largeur de 2 600 km et la résolution spatiale au nadir est de 3,5 x 7 km^2 (3,5 x 5,5 km^2 depuis le 6 août 2019). Par rapport à ses prédécesseurs SCIAMACHY, GOME-2 et OMI (voir figure 1), le gain en résolution apporté par TROPOMI est considérable et permet pour la première fois de résoudre la pollution à l'échelle des villes.

La conception de TROPOMI se base sur l'héritage de l'instrument OMI en orbite sur le satellite AURA de la NASA depuis 2004. Elle s'en différencie cependant par nombre d'améliorations techniques dont l'addition de canaux infrarouges utilisant une technologie innovante de réseaux de diffraction immergés et la réalisation d'une optique de forme libre pour le télescope d'entrée. Ces caractéristiques font de TROPOMI l'instrument le plus abouti jamais réalisé dans son domaine, ses performances atteignant et dépassant souvent les exigences définies initialement pour la mission. Bien que cette réalisation soit à mettre au crédit des Pays-Bas, notons que le Centre Spatial de Liège (CSL) a joué un rôle important dans la phase de préparation, en fournissant la plupart des équipements de calibration optique au sol et en menant une série de tests dans des conditions spatiales strictes durant plus de 130 jours.

Lancé le 13 octobre 2017 depuis le cosmodrome de Plessetsk en Russie, le satellite est placé sur une orbite héliosynchrone à une altitude de 824 kilomètres pour une durée de vie prévue de 7 ans. Du fait de la largeur de la fauchée, l'ensemble de la surface terrestre est balayée en 24 heures. L'heure locale de visite est 13h35.

Cartographie des sources de pollution urbaine et industrielle

Malgré les efforts entrepris ces dernières années pour développer de nouvelles sources d'énergie verte, l'activité anthropique dans le monde et les besoins énergétiques associés dépendent principalement de sources d'énergie fossile non-renouvelables, telles que le pétrole, le gaz et le charbon. La combustion de ces énergies fossiles est responsable de l'augmentation de la concentration du dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère, qui est une des causes principales du changement climatique. Outre leur effet sur le CO_2, les processus de combustion à l'œuvre dans les moteurs thermiques, le chauffage ou la production d'électricité émettent également d'autres espèces chimiques polluantes. L'une d'elles, le dioxyde d'azote (NO_2) – gaz réactif irritant pour les bronches et impliqué dans la formation d'ozone et de particules fines – est un marqueur efficace de l'activité anthropique dans les régions industrialisées et à forte densité de population.

Les mesures globales de NO_2 fournies par TROPOMI *(figure 2)* montrent de façon très démonstrative la prépondérance des émissions polluantes au-dessus de l'Europe, le Moyen-Orient, le sud de l'Afrique et l'est des Etats-Unis. Les sources naturelles liées aux feux sont également visibles ainsi que l'impact des routes maritimes. Mais l'apport exclusif de TROPOMI se révèle encore mieux à l'échelle des régions, où la résolution spatiale de l'instrument permet, pour la première fois depuis l'espace, d'identifier avec précision et au jour le jour les sources locales comme Bruxelles ou Anvers en Belgique et l'influence du transport par les vents *(figure 3)*.

Une autre espèce polluante mesurée par TROPOMI est le dioxyde de soufre (SO_2). Outre les volcans dont nous parlerons un peu plus loin, le SO_2 est produit lors de l'utilisation de combustibles fossiles riches en impuretés soufrées (comme le charbon et certains types de fuels) ainsi qu'en relation avec l'exploitation de divers minerais. Si la pollution au SO_2, responsable de pluies acides délétères, a pu être maîtrisée dans nos régions grâce à l'amélioration des carburants ou la désulfuration des fumées des installations de combustion, elle continue à sévir dans certaines régions du monde, en particulier en Inde où le charbon constitue la source d'énergie principale et dans les exploitations pétrolières du Moyen-Orient. Malgré des mesures d'assainissement importantes réalisées ces dernières années, la Chine reste elle-aussi une source significative *(figure 4)*. Les mesures de pollution fournies par TROPOMI

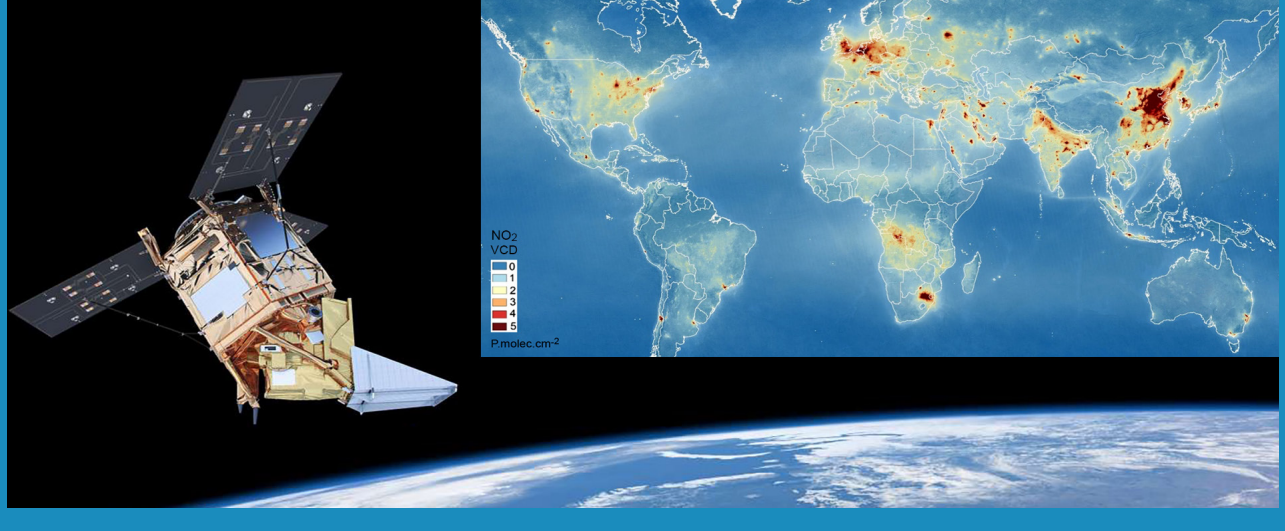

Figure 2: Représentation d'artiste du satellite Sentinel-5 Precursor sur une orbite située à 824 km d'altitude. A son bord, l'instrument TROPOMI observe le rayonnement solaire réfléchi par la terre et/ou les nuages et en déduit l'abondance de molécules atmosphériques, notamment le dioxyde d'azote (NO_2) un polluant présent dans une couche d'environ un kilomètre d'épaisseur à la surface de la terre. La carte montre la distribution moyenne sur un an des sources de pollution dans le monde. Celles-ci sont principalement dues aux activités anthropiques, notamment trafic routier ou maritime et industrie.
© BIRA-IASB/ESA/KNMI

et d'autres senseurs satellitaires dans ces régions généralement mal couvertes par les systèmes d'observation au sol sont essentielles et permettent un suivi de l'évolution des émissions dans le temps, ainsi que (via leur publication) d'une prise de conscience de l'importance de mettre en œuvre des mesures d'assainissement adéquates.

Pollution naturelle et anthropique : les composés organiques volatils

Si l'abondance du NO_2 dans l'atmosphère résulte principalement des activités humaines et industrielles, d'autres polluants sont à la fois émis par des sources anthropiques et naturelles dans des quantités comparables. C'est le cas notamment des composés organiques volatils (COVs) qui proviennent de la végétation et des feux de forêt, mais sont aussi produits par l'industrie et le transport. Ces dernières sources sont souvent majoritaires en milieu urbain. Les COVs sont très importants dans le bilan de la pollution atmosphérique, car leur dégradation s'accompagne notamment de la formation d'ozone et de particules d'aérosol.

La plupart des COVs ne peuvent pas être observés depuis l'espace, cependant TROPOMI permet de mesurer le formaldéhyde (HCHO), un produit de dégradation commun à un grand nombre de COVs. Combinées avec l'utilisation de modèles de chimie-transport développés à l'IASB, ces mesures fournissent une contrainte très utile pour optimiser les inventaires d'émission des différents COVs, et par là améliorer notre compréhension du bilan de l'ozone. Comme le NO_2, le HCHO a un temps de résidence très court dans l'atmosphère (quelques heures) et sa mesure permet donc de localiser et quantifier les sources de pollution sans interférence avec le transport par les vents. La figure 5, produite à l'IASB, montre la distribution moyenne du HCHO au cours d'une année complète. On y décèle les différentes sources liées à la végétation principalement en Amérique du Nord, Afrique Centrale, Inde et Amazonie, les feux en Afrique, Amérique Centrale et Indonésie et la pollution en Asie de l'Est (Chine).

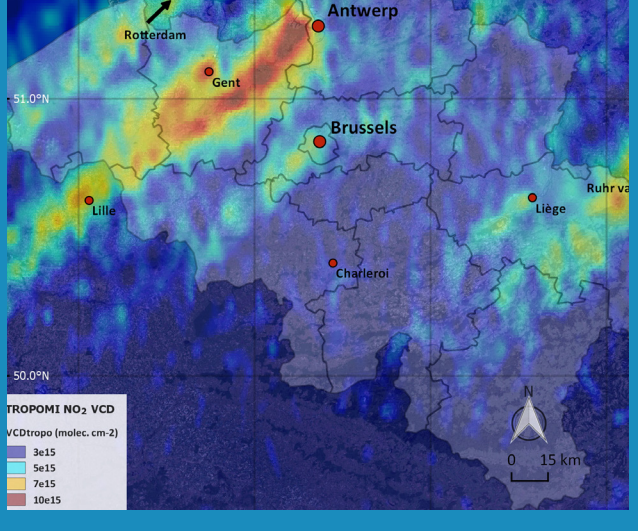

Figure 3: Distribution spatiale de la colonne troposphérique de dioxyde d'azote (NO_2) au-dessus de la Belgique, mesurée par TROPOMI le 27 juin 2019. Le transport, sous l'effet du vent de Nord-Est, de la pollution en provenance des sources urbaines d'Anvers, Bruxelles, Gand et Liège est évident. La figure montre également la pollution affectant le territoire belge en provenance de l'Allemagne (vallée de la Ruhr) et des Pays-Bas (Rotterdam). © BIRA-IASB/ESA

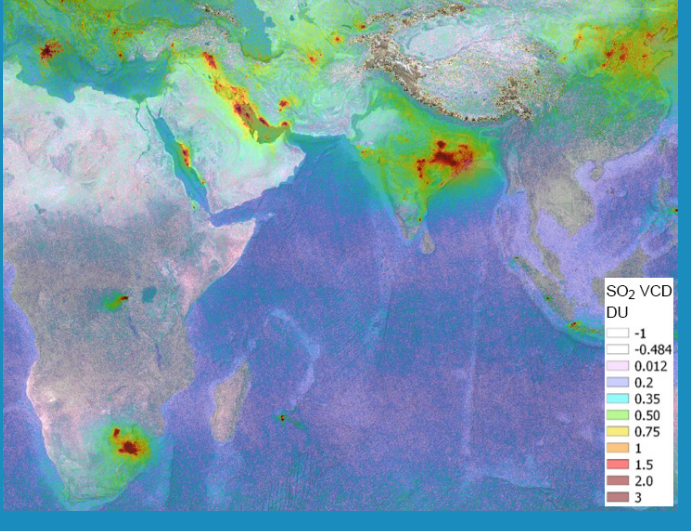

Figure 4: Moyenne annuelle des colonnes troposphériques de dioxyde de soufre (SO_2) dans les régions du Moyen-Orient, la Chine et l'Afrique. Les sources de pollution observées résultent soit de centrales électriques au charbon mal ou non-désulfurisées, soit d'exploitations pétrolières (notamment au Moyen-Orient) ou encore de l'industrie minière. Les abondances élevées dans le sud de l'Italie sont dues au volcan Etna. © BIRA-IASB/ESA/DLR

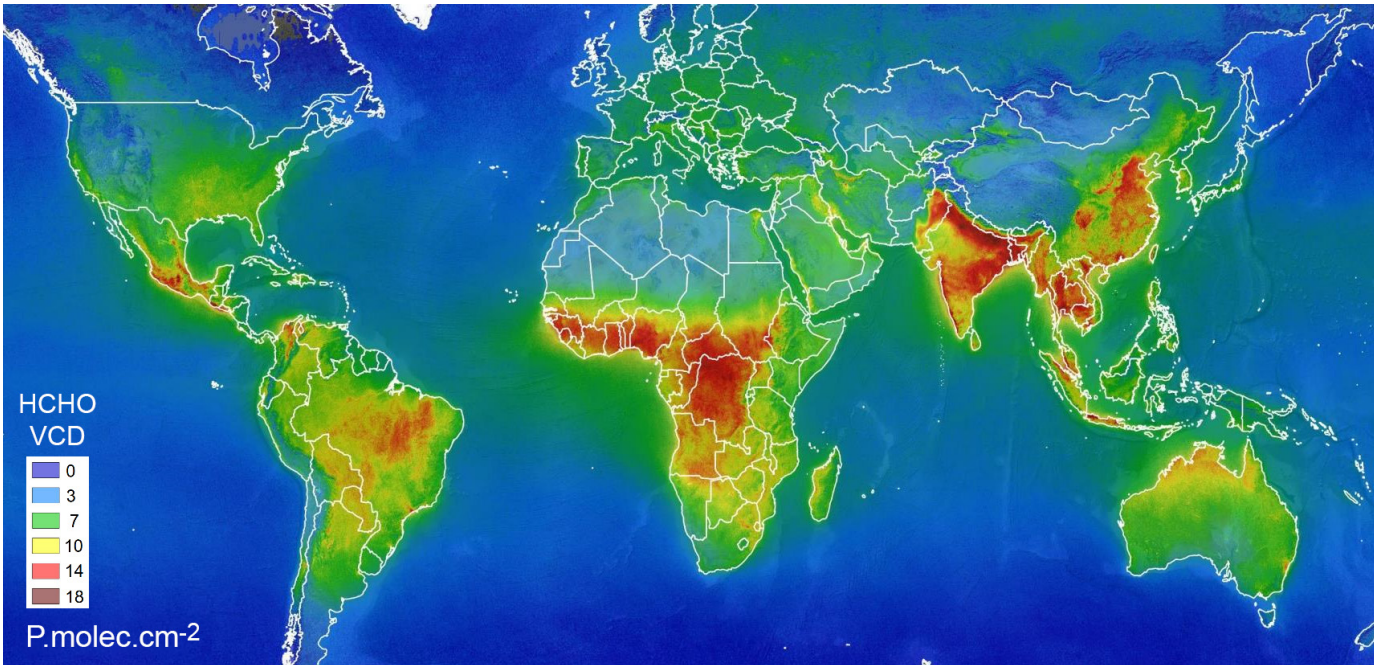

Figure 5: Carte des colonnes troposphériques de formaldéhyde (HCHO) montrant la distribution moyenne annuelle des sources de composés organiques volatils (COVs) dans le monde. Ces émissions sont soit d'origine naturelle liées aux cycles de la végétation, soit produites dans des feux de forêts principalement en zone tropicale, soit dues à la pollution anthropique (notamment en Chine). © BIRA-IASB/ESA/DLR

Comment TROPOMI mesure-t-il l'abondance des gaz atmosphériques ?

Contrairement aux instruments utilisés dans les réseaux de surveillance de la qualité de l'air, qui se basent généralement sur l'analyse chimique, les satellites utilisent des méthodes de télédétection qui exploitent le rayonnement solaire réfléchi par la terre et/ou émis thermiquement par celle-ci pour en déduire l'abondance des molécules présentes dans l'atmosphère. La méthode utilisée est celle de la spectroscopie d'absorption, qui consiste à résoudre la lumière solaire en ses différentes composantes de longueur d'onde (c'est-à-dire en ses différentes couleurs).

Comme chaque molécule possède un spectre d'absorption qui lui est propre (en quelque sorte son empreinte digitale), il est possible d'identifier lors de l'analyse quelles sont les molécules présentes dans l'atmosphère et en quelle quantité. Dans les régions de l'ultraviolet, du visible et du proche infrarouge mesurées par TROPOMI, de nombreuses molécules peuvent ainsi être détectées sans ambiguïté et, à l'aide d'algorithmes mathématiques complexes qui décrivent le transfert de la radiation solaire dans l'atmosphère, leur abondance est quantifiée et rapportée sous forme numérique ou en code de couleur comme dans les cartes de cet article.

Basé sur l'héritage de plusieurs autres missions européennes lancées depuis 1995, les chercheurs de l'IASB ont acquis une expertise de renommée internationale dans ce domaine, ce qui les a amenés à contribuer au développement des processeurs de données de TROPOMI depuis les premières phases de la mission jusqu'à aujourd'hui, au sein du Sentinel-5P Mission Performance Center (MPC).

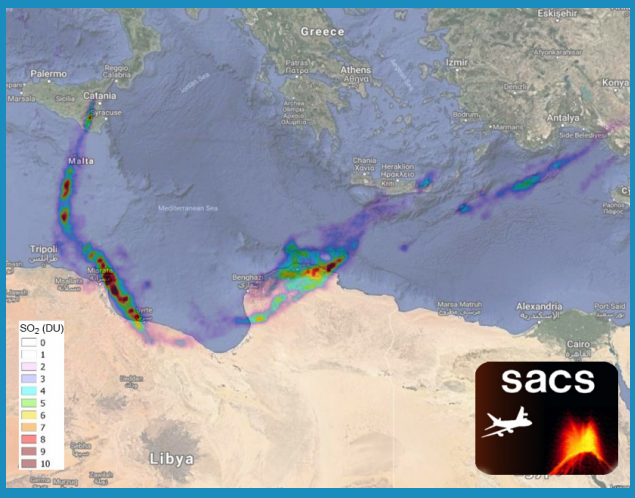

Figure 6 : Panache de dioxyde de soufre (SO_2) éjecté par le volcan Etna dans le sud de l'Italie le 26 décembre 2018. La carte montre la dispersion du panache sous l'action des vents dans la basse atmosphère. Ces données sont utilisées comme un indicateur de la présence de cendres volcaniques dans le cadre du service de support au contrôle de l'aviation (SACS) développé à l'IASB pour informer sur le danger volcanique. © BIRA-IASB/ESA/DLR

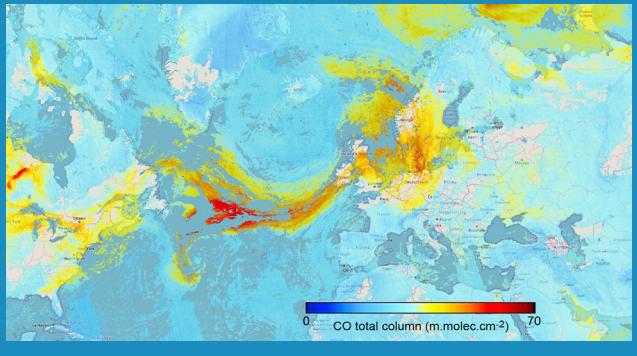

Figure 7: Panache de monoxyde de carbone (CO) émis le 15 août 2018 par des feux de forêts intenses localisés en Californie et transporté par les vents à travers l'atlantique jusqu'en Europe du Nord. Les mesures de CO de TROPOMI montrent bien l'impact du transport à large échelle sur la pollution de l'air. © KNMI/ESA

Risques naturels : les volcans et les feux de forêt

Outre sa résolution spatiale élevée, TROPOMI dispose également d'un système de traitement de données performant et rapide, très utile pour les applications en temps réel. Grâce à cette rapidité d'action, TROPOMI peut notamment détecter les épisodes soudains de pollution et contribuer à la gestion des risques associés.

Un exemple est celui des volcans dont les éruptions (environ 50 par an en moyenne dans le monde) émettent dans l'atmosphère de grandes quantités de cendres et de gaz corrosif susceptibles d'endommager les moteurs d'avion. Compte tenu du trafic aérien en constante augmentation, le risque lié au volcanisme est pris très au sérieux par les compagnies d'aviation et fait l'objet de centres spécialisés, les VAACs (Volcanic Ash Advisory Centers). En support aux VAACs, l'IASB a développé le service SACS (Support to Aviation Control Service, http://sacs.aeronomie.be) qui utilise les données de différents satellites, dont TROPOMI, pour détecter les éruptions volcaniques et informer au mieux les instances concernées. La figure 6 montre un exemple de panache de SO_2 (utilisé ici comme indicateur de la présence possible de cendres) mesuré par TROPOMI le 26 décembre 2018 suite à une éruption de l'Etna dans le Sud de l'Italie. Grâce à sa résolution spatiale élevée et sa grande sensibilité, TROPOMI permet aussi de surveiller le dégazage régulier de volcans en activité, ce qui permet d'aider à la prévision de possibles éruptions futures.

Un autre exemple concerne les feux de forêt dont l'actualité récente a montré la recrudescence, notamment en Australie et aux Etats-Unis. La probabilité que de tels événements se multiplient dans les prochaines années est élevée, car en asséchant la végétation, le changement climatique entraîne une augmentation du danger de feux avec un impact environnemental important. Suite à la combustion de la biomasse, les feux de forêts émettent de nombreux polluants dans l'atmosphère dont plusieurs (notamment NO_2, HCHO, CHOCHO, HONO, CO et les aérosols absorbants) peuvent être quantifiés par TROPOMI, ce qui aide à mieux cerner l'impact des feux sur la qualité de l'air environnant, mais aussi sur l'impact du transport de cette pollution à plus longue distance. La figure 7 montre comment les mesures de monoxyde de carbone (CO, une molécule dont le temps de résidence dans l'atmosphère est de plusieurs mois) permettent de suivre l'évolution du panache de pollution sur de très longues distances, ici depuis la Californie jusqu'au Nord de l'Europe.

La gestion de l'incertitude, une spécialité développée à l'IASB

Sans une évaluation appropriée de sa qualité et une estimation précise de son incertitude, aucune donnée ne peut être utilisée avec confiance. Ceci est particulièrement vrai pour tout nouveau système de mesure, en particulier pour TROPOMI. Copernicus et l'ESA ont par conséquent élaboré et implémenté un programme de vérification et de validation exhaustif adressant toutes les composantes de la mission, depuis la radiance solaire directement mesurée par les spectromètres jusqu'aux produits géophysiques dérivés par analyse mathématique, c'est-à-dire l'abondance de colonne des différentes molécules.

Tandis que l'instrument lui-même est surveillé aux Pays-Bas par les concepteurs de TROPOMI, un système automatisé hébergé à l'IASB (http://s5p-mpc-vdaf.aeronomie.be) surveille en continu les performances des données de TROPOMI. Cette analyse est soutenue par un éventail d'activités de validation approfondies spécifiques. Les mesures corrélatives fournies par les réseaux opérationnels d'observation (tels que le NDACC, TCCON, PGN, GAW, etc.) et les données d'autres satellites servent de référence indépendante. Les analyses se basent sur de nombreux outils, la plupart développés à l'IASB, dont notamment des modèles numériques simulant l'atmosphère et capables d'ingérer intelligemment les données, par exemple dans des schémas de modélisation inverse.

L'ensemble de ces études résulte en une estimation fiable des incertitudes liées à chaque donnée, ainsi qu'en recommandations utilisées pour améliorer les algorithmes produisant ces données.

Le méthane, un gaz à effet de serre empreint de mystère

Après le CO_2, le méthane (CH_4) est le deuxième gaz à effet de serre anthropogénique. Bien que son abondance dans l'atmosphère soit moindre que celle du CO_2, son pouvoir de réchauffement par molécule est beaucoup plus élevé ce qui explique son importance relative. Par rapport au CO_2, le CH_4 se dissipe également beaucoup plus vite dans l'atmosphère (environ en 10 ans, contre 100 ans pour le CO_2), ce qui implique qu'une réduction de l'abondance de cette molécule aura un impact plus rapide sur le bilan radiatif de la terre. Comme le CO_2, le CH_4 a été à la hausse tout au long des décennies 80 et 90, mais il semblait s'être stabilisé au tournant du millénaire… jusqu'à ce que son abondance se remette à croître depuis 2007, pour des raisons qui actuellement restent mal comprises et mobilisent une très large communauté de scientifiques dans le monde.

Si la distribution globale du CH_4 a été mesurée dans le passé à l'aide de plusieurs satellites, dont SCIAMACHY sur la plateforme ENVISAT ou le satellite japonais GOSAT, TROPOMI est le premier instrument spatial permettant de cartographier cette molécule à haute résolution avec une couverture globale journalière et une précision inférieure au pourcent. Pour atteindre de telles performances, TROPOMI utilise une technologie instrumentale innovante mais également des algorithmes de restitution complexes nécessitant l'utilisation de données auxiliaires sur les nuages, fournies par le satellite américain S-NPP qui vole en tandem avec Sentinel-5P dans le cadre d'un accord de coopération ESA-NASA. Quant à elle, la Belgique joue un rôle important dans la validation, particulièrement critique, de ces données (voir encart).

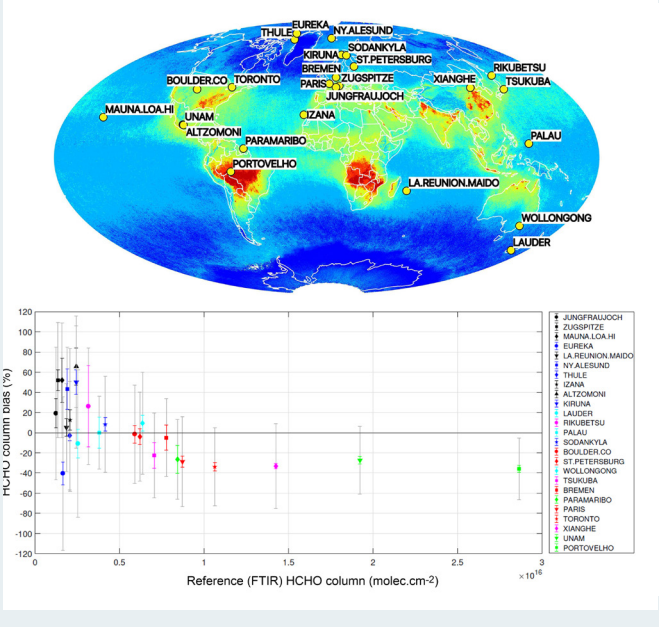

Figure 8: Comparaison entre les colonnes troposphériques de formaldéhyde (HCHO) de TROPOMI et des mesures de référence obtenues à l'aide du réseau de spectromètres à transformée de Fourier (FTIR) du NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change). Les résultats montrent que TROPOMI tend à surestimer les abondances de HCHO pour les faibles valeurs et à les sous-estimer pour les valeurs élevées. De tels résultats de validation sont très utiles pour progresser dans l'amélioration des algorithmes de traitement de données du satellite. © BIRA-IASB/NDACC

Conclusions

Sentinel-5 Precursor/TROPOMI est la première mission du programme européen Copernicus dédiée à la surveillance de la composition atmosphérique. Lancée avec succès en octobre 2017, elle totalise plus de deux années d'observation dont dix mois en phase opérationnelle. La plupart des produits géophysiques (NO_2, CO, HCHO, SO_2, O_3, CH_4, nuages et indices d'aérosol) ont atteint le statut opérationnel et sont distribués en accord avec la politique de Copernicus qui autorise l'accès gratuit et inconditionnel aux données d'observation.

Les performances remarquables de TROPOMI, démontrées par le système de validation opérationnel développé à l'IASB, permettent une détection plus détaillée de la pollution au niveau des villes et des grands axes de transport, des sources naturelles et anthropiques, et des risques environnementaux liés aux éruptions volcaniques et aux feux de forêt. Sentinel-5P fournit non seulement une contribution majeure au service Copernicus de surveillance de l'atmosphère (CAMS) mais il est également utilisé dans un nombre croissant de services environnementaux en Europe et dans le monde, notamment aux Etats-Unis, en Chine et au Japon. En Belgique, les données de TROPOMI sont en cours d'intégration dans le système TERRASCOPE qui rassemble les données d'observation de la terre à l'attention les utilisateurs belges (voir https://terrascope.be/en).

Avec ses partenaires du consortium TROPOMI, l'IASB contribue activement à la recherche scientifique nécessaire pour développer de nouveaux produits géophysiques (par exemple, la possibilité de mesurer le HONO, une molécule importante dans la chimie des feux de forêt, a récemment été démontrée par nos chercheurs) et pour améliorer la précision et la fiabilité des produits existants. Il s'investit également dans l'exploitation scientifique de la mission, par exemple en intégrant les données dans des modèles numériques de l'atmosphère.

Conçue comme le précurseur de Sentinel-5, Sentinel-5P prépare l'avènement d'une ère nouvelle pour l'observation de l'atmosphère qui reposera sur une constellation composée de trois satellites en orbite géostationnaire, proposant des mesures horaires de la composition atmosphérique respectivement au-dessus de l'Europe, l'Asie et les Etats-Unis, complétés par plusieurs satellites offrant une couverture journalière globale en orbite basse. Sur base de ses acquis, l'IASB ambitionne de fournir une contribution importante à la mise en œuvre et l'exploitation de ce système.

REMERCIEMENTS

La recherche et les développements réalisés à l'IASB en support de la mission TROPOMI sont financés par la Politique scientifique fédérale (Belspo) dans le cadre du programme PRODEX (projets TRACE-S5P et TROVA) ainsi que par l'ESA au sein du Sentinel-S5P Mission Performance Center et du programme Sentinel-5P Innovation. Nous remercions nos partenaires internationaux de l'Institut Météorologique Royal et de l'Institut de Recherche Spatiale des Pays-Bas (KNMI et SRON), l'Agence Spatiale Allemande (DLR), les universités de Bremen et de Thessalonique, le Rutherford Appleton Laboratory au Royaume Uni, et l'institut Max-Planck de Mainz.

L'AUTEUR

Michel Van Roozendael est chef de division et responsable du groupe de recherche UV-Vis DOAS à l'IASB. Il a commencé sa carrière au début des années 1990 en étudiant la problématique de la destruction d'ozone et en développant les observations de spectroscopie UV-Vis de l'institut. A partir des années 2000, il a monté son propre groupe de recherche focalisé sur la cartographie satellitaire des gaz en trace dans la troposphère ainsi que le développement de la technique MAX-DOAS. Il est impliqué dans différents comités de support scientifique aux missions de l'ESA et auteur ou co-auteur de plus de 200 articles dans des revues internationales à comité de lecture.