

Pas d'image fiable de notre atmosphère sans mesures depuis le sol !

Nous sommes actuellement confrontés à une atmosphère en évolution : les concentrations de ce qu'on appelle les gaz à effet de serre augmentent, la quantité d'ozone stratosphérique diminue, en particulier au-dessus de l'Antarctique où elle forme chaque année un 'trou' dans la couche d'ozone, et l'air n'est pas tous les jours très sain...

Comment pouvons-nous détecter et surveiller ces changements pour, si nécessaire, prendre des mesures pour tenter de les contrecarrer ?

Par l'observation!

Les satellites fournissent de belles cartes de la distribution mondiale de la concentration de gaz présents dans l'atmosphère. Mais comment nous assurer de leur fiabilité? Comment suivre l'évolution à long terme de l'atmosphère en comparant des cartes obtenues à l'aide d'un satellite, qui a une durée de vie de seulement cinq ans, avec celles générées par un satellite ultérieur, qui pourrait avoir des caractéristiques très différentes ? En outre, la fiabilité des satellites évolue au cours du temps, suite à l'exposition continue de leurs composants optiques et électroniques à des radiations hautement énergétiques.

Afin de répondre à toutes ces questions, nous avons besoin de références, dont la stabilité et la qualité sur le long terme

peuvent être suivies. Ces références, ce sont les mesures depuis le sol, avec des instruments de pointe dont nous pouvons vérifier en permanence la qualité et la stabilité. Dans le cadre des projets nationaux AGACC-I et -II, financés depuis 2006 par la Politique scientifique fédérale dans le cadre du programme 'Science pour un Développement Durable', quatre instituts de recherche belges s'attèlent à améliorer et à étendre ce genre de mesures depuis le sol. Ces instituts sont l'Institut d'Aéronomie spatiale de Belgique (IASB), coordinateur des projets; l'Institut royal météorologique; le Groupe Infra-Rouge de Physique atmosphérique et solaire (GIRPAS) de l'Institut d'Astrophysique et de Géophysique de l'Université de Liège; et une équipe du Service de Chimie quantique et photophysique de l'Université Libre de Bruxelles. Avec leurs mesures de la composition atmosphérique, les trois premières équipes contribuent au 'Network for the Detection of Atmospheric Composition Changes (NDACC - www.ndacc.org)'. Ces mesures sont réalisées à Harestua (Norvège), à Bruxelles (Belgique), au Jungfraujoch (Alpes suisses), à l'Observatoire de Haute Provence (France) et sur île de La Réunion (Océan Indien). Depuis 2008 – à l'occasion des Jeux Olympiques de Pékin où la qualité de l'air devait être surveillée de près, nous réalisons également des mesures à Xianghe (Chine) et, depuis novembre 2013, à Bujumbura (Burundi). Ces mesures sont toutes basées sur des techniques de spectrométrie optique. Le quatrième partenaire mesure au laboratoire les caractéristiques spectroscopiques.



Figure 1 : La station d'observation de La Réunion.



Figure 2 : Spectromètre Brewer sur le toit de l'IRM à Uccle.



Figure 3 : Photomètre solaire sur le toit de l'IASB à Uccle.

piques des gaz atmosphériques, indispensables à l'analyse des spectres atmosphériques enregistrés.

Techniques de mesure

Quatre techniques de mesure sont appliquées dans les projets AGACC : la spectrométrie Brewer pour les mesures d'ozone, d'UV et d'aérosols (figure 2); la photométrie solaire (figure 3) pour les paramètres caractéristiques des aérosols tels que la densité optique totale; la spectroscopie d'absorption solaire dans l'infrarouge (entre 1,25 et 16 micromètres) à haute résolution spectrale, dénommée ci-après spectroscopie FTIR; et la technique dite MAX-DOAS qui permet d'analyser l'UV et une partie visible du spectre (300-600 nm) de la lumière solaire diffuse, au zénith ou dans différentes directions au-dessus de l'horizon. Les deux dernières techniques permettent de déterminer les concentrations de nombreux gaz dans l'atmosphère, et d'obtenir des informations sur la répartition verticale de ces gaz. La figure 4 montre un spectre d'absorption FTIR typique enregistré au Jungfraujoch. Ces spectres contiennent une multitude de raies d'absorption (trous dans le spectre), fournissant des informations sur la concentration d'un grand nombre de gaz atmosphériques. Un spectre MAX-DOAS est assez similaire, mais concerne une gamme de longueurs d'onde différente.

Pour appliquer ces techniques de spectroscopie optique à l'identification et à la quantification de composés présents dans l'atmosphère, il est évidemment indispensable de connaître les caractéristiques spectroscopiques de ces gaz, c'est-à-dire par exemple à quelles longueurs d'onde et

avec quelles intensités ils absorbent le rayonnement électromagnétique solaire. En d'autres mots, il faut disposer d'une connaissance très détaillée du spectre d'absorption des molécules présentes dans l'atmosphère. Ces informations cruciales sont obtenues au laboratoire, par l'étude des espèces pressenties dans des conditions maîtrisées. A titre d'exemple, la figure 5 présente une toute petite partie du spectre d'absorption du formaldéhyde. Ce spectre présente des structures étroites (les raies) dont les positions et intensités sont une signature caractéristique de la molécule. Son observation dans un spectre de l'atmosphère atteste de la présence de la molécule, et l'intensité des raies détermine la quantité de gaz présent. Toutes les molécules présentes sur le trajet du rayonnement électromagnétique entre le Soleil et l'observateur absorbent ce rayonnement. Les signatures spectrales de toutes ces molécules apparaîtront donc dans le spectre enregistré, permettant l'identification et la quantification des gaz simultanément présents au même endroit et au même instant. Cette caractéristique de la spectroscopie en fait sa puissance; elle est cruciale pour, par exemple, étudier et comprendre les processus physico-chimiques impliqués dans l'atmosphère.

Principaux résultats d'AGACC

Mesures de la vapeur d'eau

La vapeur d'eau présente dans l'atmosphère est déterminante pour le climat. Par conséquent, il est crucial d'en mesurer avec précision la quantité et l'évolution. Dans le cadre du projet AGACC, différentes méthodes de mesure ont été étudiées, comparées entre elles et avec des mesures

satellitaires, et améliorées. Nous avons appris entre autres que la quantité de vapeur d'eau est très variable dans l'espace et dans le temps, compliquant la comparaison des différentes mesures. Nous avons également appris que les mesures FTIR permettent de déterminer la quantité totale d'eau avec une précision d'environ 2 %. Les erreurs instrumentales affectant les longues séries temporelles de la distribution verticale de la vapeur d'eau mesurées à Uccle à l'aide de sondes radio depuis 1990 ont été corrigées. La série corrigée et homogénéisée a permis de constater que le taux d'humidité relative a augmenté dans la troposphère supérieure jusqu'en 2001, pour ensuite diminuer. En revanche, au Jungfraujoch, nous ne constatons pas d'évolution significative à long terme de la quantité totale de vapeur d'eau dans l'atmosphère au cours de la période 1988-2012.

Mesures des propriétés des aérosols

Un aérosol est un mélange de petites particules (solides ou liquides) en suspension dans un gaz, par exemple l'atmosphère. Ces particules sont formées par des processus naturels (par exemple les feux de forêt) ou certaines activités humaines (par exemple combustion industrielle, circulation automobile, ...). Elles ont des caractéristiques très différentes de taille (de nanomètres à 100 micromètres), de forme, de composition chimique et de propriétés optiques. Leur présence détermine en partie la visibilité, la qualité de l'air et le climat, et a un impact significatif sur notre santé et sur la quantité d'UV qui nous atteint.

A Uccle, mi-2006, et à Bujumbura, en novembre 2013, des photomètres solaires ont été installés pour la surveillance continue et automatique de la densité optique totale et de quelques propriétés optiques des aérosols. Ces informations peuvent être consultées à l'adresse <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>.

La densité optique des aérosols a également pu être déduite de la longue série de mesures Brewer faite à Uccle depuis 1984. Ces données sont maintenant utilisées quotidiennement dans les prévisions de l'indice UV à destination du public, améliorées grâce à ces informations. En outre, nous travaillons sur la validation d'un modèle permettant de prédire la composition d'aérosols afin d'améliorer les prédictions de l'indice UV.

Les travaux d'AGACC ont par ailleurs démontré que les mesures MAX-DOAS permettaient également d'obtenir des informations sur les aérosols, en particulier la distribution verticale du coefficient d'extinction des particules d'aérosol et leur densité optique (coefficient intégré d'extinction verticale dans la troposphère). Ces paramètres, dépendant du type d'aérosol, sont une mesure de la quantité de lumière qui est dispersée ou absorbée par les particules à une longueur d'onde donnée. Dans le cadre du projet AGACC, nous avons beaucoup travaillé sur la mise au point de la technique MAX-DOAS et sommes à présent certains de sa fiabilité. Elle est appliquée à Uccle, au Jungfraujoch, à Xianghe et à Bujumbura. A titre d'exemple, la figure 6 montre les différences de concentrations de particules, et donc du niveau de pollution de l'air, entre Xianghe, Uccle, et le Jungfraujoch en 2012.

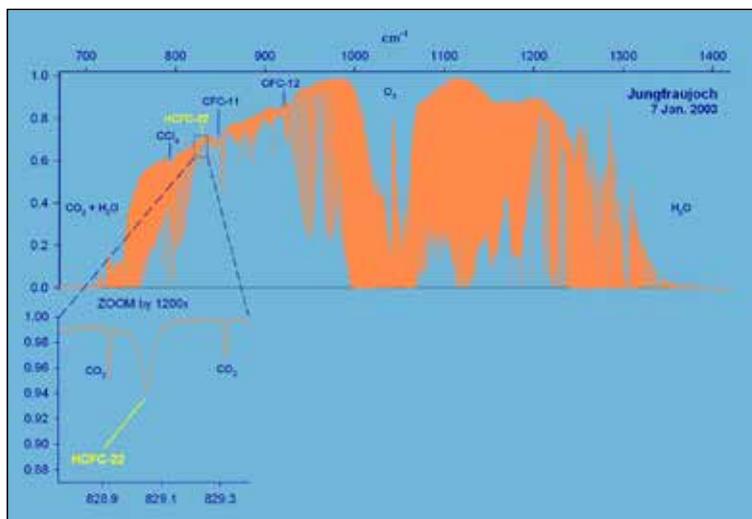


Figure 4 : Spectre FTIR typique entre 7 et 14 micromètres. Des absorptions par l'ozone, la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone (CO_2) y sont identifiées. La partie inférieure montre une portion du spectre agrandie 1200 fois, permettant de visualiser une signature spectrale associée au HCFC-22.

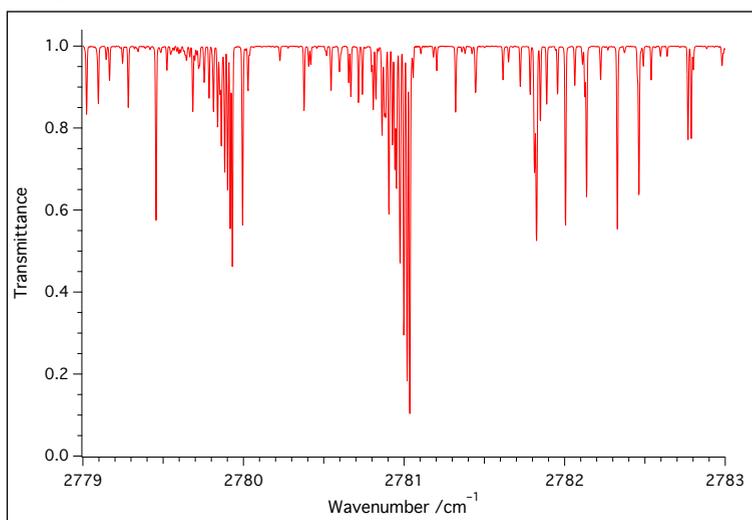


Figure 5 : Petite partie du spectre d'absorption du formaldéhyde enregistré au laboratoire ('wavenumber' est l'inverse de la longueur d'onde du rayonnement électromagnétique incident); les positions et intensités des structures fines observées sont une signature propre à la molécule.

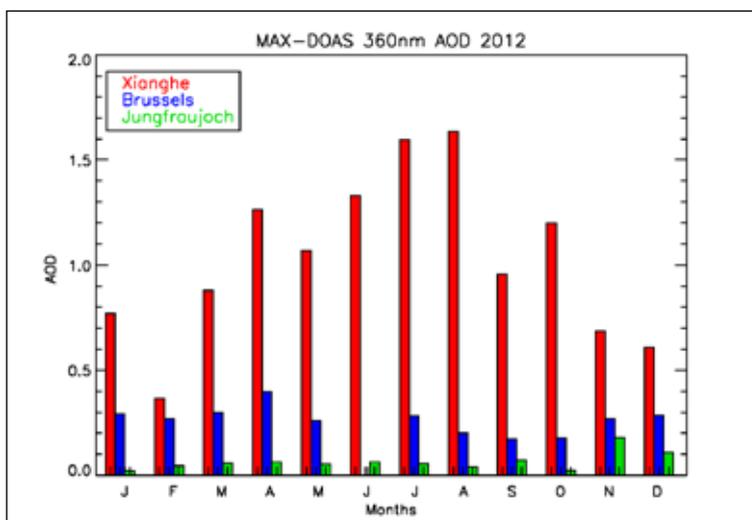


Figure 6 : Moyennes mensuelles des densités optiques d'aérosols (AOD) mesurées en 2012 à l'aide d'instruments MAX-DOAS opérés par l'IASB aux stations de Xianghe (Pékin), Uccle et du Jungfraujoch (Alpes suisses). L'analyse des mesures a été effectuée à l'aide du modèle de transfert radiatif bePRO, également développé par l'IASB.



Figure 7 : Depuis 2010, l'IASB utilise l'instrument MAX-DOAS au Jungfraujoch. Sur cette image, les chercheurs Christian Hermans et Frederik Tack remplacent quelques éléments de l'instrument. © High Altitude Research Stations Jungfraujoch and Gornergrat



Figure 8 : Lors d'éruptions volcaniques comme celle du Eyjafjallajökull, des informations sur la présence de poussières volcaniques dans l'atmosphère peuvent être fournies rapidement. (CC bjarkis-SA 2.0)

Un réseau de célo mètres (une sorte de petit LIDAR - Light Detection And Ranging) a été simultanément mis sur pied en Belgique. Ces instruments fournissent également des informations sur la distribution verticale des particules d'aérosols dans la troposphère. Ces mesures sont maintenant au point et nous entamons l'étude des caractéristiques des aérosols au-dessus d'Uccle, de leur variabilité, de leur origine, etc. Nous pouvons par ailleurs faire face à une éruption volcanique telle que celle de 2010 du Eyjafjallajökull en Islande, à savoir fournir rapidement des informations sur la présence de poussières volcaniques dans l'atmosphère et, si nécessaire, mettre en garde l'aviation.

Mesures de gaz: les problématiques de l'ozone et du climat

L'air est composé de 78 % d'azote (N_2), 21 % d'oxygène (O_2), 1 % d'argon et de traces de centaines de gaz différents, mais non moins importants pour nos conditions de vie. Ceux-ci comprennent le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), l'ozone (O_3), et toutes sortes des composés organiques volatils (COV) et espèces contenant du chlore, du brome et de l'azote (figure 9).

Dans le cadre du projet AGACC, nous nous sommes attelés à améliorer la détection d'un certain nombre de gaz extrêmement importants, soit dans le contexte de la problématique de l'ozone stratosphérique, soit dans le cadre du changement climatique, soit dans les deux. En effet, il s'avère que certains substituts des gaz destructeurs de l'ozone bannis par le Protocole de Montréal, effectivement moins nocifs pour l'ozone stratosphérique, contribuent au réchauffement climatique. Les problématiques du changement climatique et de la couche d'ozone sont donc indissociables! Il

ne faut d'ailleurs pas oublier que l'ozone troposphérique est également un gaz à effet de serre...

Au Jungfraujoch, nous suivons de près l'évolution de l'ozone et des gaz qui affectent cette évolution, à savoir les composés contenant du chlore et du brome, et en particulier les 'nouveaux' produits de substitution tels que HC-FC-142b. Les mesures confirment une hausse de l'abondance des produits de substitution dans la troposphère, mais attestent également de la réduction des gaz contenant du chlore et du brome dans la stratosphère, là où ils sont responsables de la destruction de l'ozone. Au cours des dernières années (depuis 2008), nous avons constaté une augmentation de HCl, un important réservoir de chlore dans la stratosphère, non seulement au Jungfraujoch, mais aussi à d'autres stations d'observation NDACC dans l'hémisphère nord. Cette augmentation est probablement due à un changement dans les vitesses de transport dans l'atmosphère. Elle démontre une fois de plus la nécessité d'une surveillance continue !

Au Jungfraujoch et sur l'île de La Réunion, nous suivons avec précision l'évolution des principaux gaz à effet de serre, CO_2 et CH_4 . Au Jungfraujoch, nous avons utilisé des méthodes modernes pour analyser des mesures historiques de CH_4 et ainsi obtenir une série temporelle de l'évolution de sa concentration de 1976 à nos jours (figure 10). Sur l'île de La Réunion, nous avons installé un spectromètre FTIR qui mesure les gaz à effet de serre dans le proche infrarouge et qui, depuis 2011, est repris dans le Total Carbon Column Observing Network (TCCON - www.tccon.caltech.edu). Nous disposons maintenant d'une série temporelle de trois ans, non seulement de CO_2 et CH_4 , mais aussi de N_2O , CO,

H₂O... Nous atteignons une précision de l'ordre de 0.25 % pour CO₂, et de 0.3 % pour CH₄.

Sur l'île de La Réunion, nous avons mené une grande étude sur la détection des COV. Différents gaz ont ainsi été identifiés et quantifiés: le méthanol (CH₃OH), le cyanure d'hydrogène (HCN), le formaldéhyde (HCHO), l'éthane (C₂H₆), l'acétylène (C₂H₂), l'acide formique (HCOOH), etc. Il a été démontré que plusieurs de ces gaz se retrouvent au-dessus de l'île de La Réunion suite à des incendies à Madagascar, en Afrique centrale et australe, et même en Amérique du Sud et en Asie de l'Ouest. Les facteurs d'émission ont pu être déterminés pour ces différents gaz. Ces mesures ont également contribué à la vérification des observations satellitaires et des modèles de processus atmosphériques, qui ont démontré la présence d'une source importante d'acide formique dans les écosystèmes tropicaux et boréaux (voir *Science Connection* 37, pp 26-29.).

A Bujumbura, les premières données sur des polluants tels que le formaldéhyde sont à présent disponibles. Elles sont d'une importance capitale pour les modèles et les observations satellitaires en Afrique, où il n'y a presque pas d'observations depuis le sol. Cela motive également les étudiants locaux à suivre notre formation en chimie atmosphérique et à travailler avec nous dans la station d'observation.

Résumé et conclusions : 'Monitoring matters'

Grâce au projet AGACC, les observations depuis le sol ont gagné en importance et en qualité, et nous avons contribué à la vérification et à l'amélioration des observations satellitaires et des modèles numériques de l'atmosphère.

Les données de laboratoire nous ont permis d'améliorer les mesures. Elles sont également disponibles dans des bases de données internationales, qui profitent à tous ceux qui sont concernés par les observations atmosphériques.

Les nouvelles séries temporelles de concentrations atmosphériques au-dessus des stations AGACC sont incluses dans la base de données NDACC. Ces données deviennent ainsi disponibles à toute la communauté scientifique, mais aussi aux décideurs politiques, grâce à leur inclusion dans des rapports d'évaluation de l'atmosphère, comme le 'Scientific Assessment of Ozone Depletion' de l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale/World Meteorological Organization) tous les quatre ans. Les techniques de mesure développées dans AGACC ont également été adoptées par d'autres équipes au sein du NDACC.

Les progrès réalisés dans AGACC permettent également aux scientifiques belges de jouer un rôle important dans des campagnes de mesures internationales, par exemple pour soutenir la validation de nouveaux satellites tels que TROPOMI (www.tropomi.eu/TROPOMI/Home.html).

Il est important de poursuivre l'amélioration continue des mesures depuis le sol. Il est également extrêmement important de compléter les séries temporelles existantes avec les moyens existants. Seule une surveillance continue de l'at-

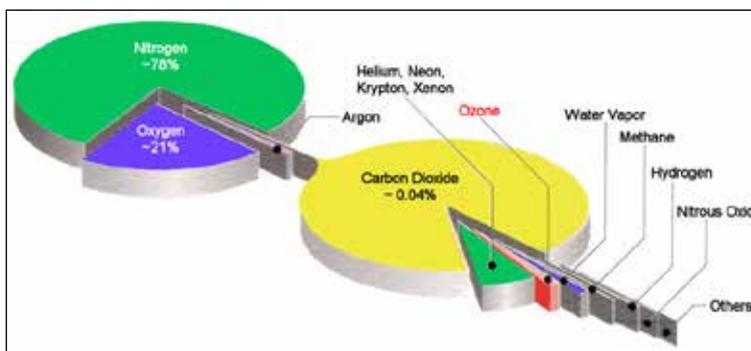


Figure 9 : Composition chimique de l'atmosphère terrestre.

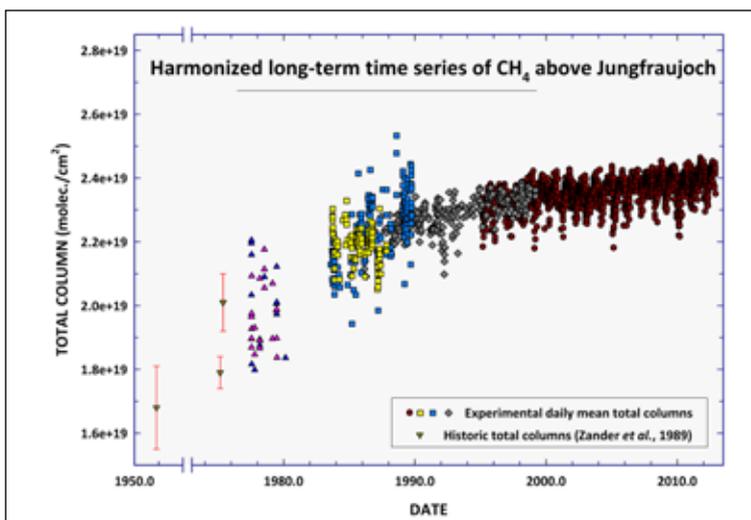


Figure 10 : Série temporelle du méthane, un puissant gaz à effet de serre. Ces mesures à très long terme ont permis de caractériser l'augmentation continue de son abondance au-dessus de l'Europe, de près de 40 % depuis 1950 !

mosphère nous permettra de suivre et caractériser son évolution à long terme. Cette démarche est essentielle pour apporter l'appui scientifique nécessaire à l'élaboration d'une politique environnementale efficace. Nous essayons autant que possible de standardiser et d'automatiser les mesures et leurs analyses. Néanmoins, nous aurons toujours besoin de scientifiques pour en garantir la qualité.

En résumé: il n'y a pas de bonne politique sans informations scientifiques fiables, pas d'informations fiables sans mesures fiables, pas de mesures fiables sans mesures continues et de qualité depuis le sol et de données de laboratoire sous-jacentes !

'Monitoring matters'

Remerciements au Projet de coopération avec le Burundi, financé par Belspo.

Les auteurs

Martine De Mazière, Hugo De Backer, Emmanuel Mahieu, Jean Vander Auwera, Whitney Bader, Veerle De Bock, Filip Desmet, Tomas Földes, Clio Gielen, François Hendrick, Christian Hermans, Bavo Langerock, Bernard Lejeune, Alexander Mangold, Marcela Tudorie, Roeland Van Malderen, Michel Van Roozendaal et Corinne Vigouroux.