

La campagne de mesures CINDI-2



Figure 1: Les instruments MAX-DOAS installés sur le toit des containers.

Gaia Pinardi,

Frederik Tack

Jeroen van Gent,

François Hendrick et

Michel Van Roozendaal

Les changements induits par l'activité humaine sur la composition de l'atmosphère terrestre et les modifications connexes de notre environnement et du climat sont un sujet de préoccupation croissant, à la fois pour le grand public et les décideurs politiques. Ils motivent le développement d'un système de surveillance mondial reposant sur des instruments de mesure opérant à partir de stations au sol et de plates-formes aériennes et satellitaires. De telles observations sont non seulement essentielles pour évaluer l'impact de phénomènes naturels et de l'activité anthropique actuelle ou future, mais aussi pour valider la capacité prédictive des théories utilisées pour modéliser l'atmosphère terrestre.

Depuis près de deux décennies, l'Institut royal d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB-BIRA) a contribué à de tels développements en participant aux missions de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) dédiées à l'observation de la composition atmosphérique terrestre (par exemple, les instruments satellitaires GOME et SCIAMACHY). Dans le cadre d'une équipe internationale impliquant plusieurs pays européens, l'IASB prépare actuellement les futures missions Sentinelles 4, 5 et 5P qui fourniront des observations spatiales des polluants atmosphériques en appui du programme Copernicus de l'Union Européenne dont le but est d'établir des services environnementaux à l'échelle mondiale.

La méthode DOAS pour la télédétection atmosphérique et les mesures in-situ : voir et sentir

La méthode DOAS consiste à étudier la variation de l'intensité d'une source lumineuse en fonction de la longueur d'onde, aussi appelée spectre. En traversant un milieu gazeux, ce spectre est modifié par l'absorption de la lumière par les molécules présentes. Cette absorption est spécifique à chaque espèce chimique; celle-ci laissant ainsi une sorte d'empreinte digitale dans le spectre de lumière. Les différences d'intensité entre les longueurs d'onde où l'absorption par la molécule est forte et celle où elle est faible permettent alors de quantifier le nombre de molécules se trouvant sur le trajet de la lumière.

Appliquée à la lumière du Soleil diffusée dans le ciel, la technique DOAS permet de quantifier la colonne (concentration d'une espèce chimique intégrée à la verticale du point d'observation) de gaz tels que le NO_2 , c'est-à-dire absorbant la région UV-visible du spectre solaire. La *colonne* peut être définie comme l'épaisseur de la couche du gaz considéré dans l'atmosphère. Comme la quantité mesurée n'est pas directement en contact avec l'instrument, on parle de mesures de *télédétection*. Les mesures in-situ, au contraire, reposent sur l'analyse chimique des prélèvements d'air effectués directement aux stations. Par analogie avec les sens humains, les mesures de télédétection s'apparentent à la vue et les mesures in-situ à l'odorat.



Figure 2: Mosaique illustrant les différents types d'instruments MAX-DOAS utilisés pendant CINDI (© A. Piters, KNMI).



Figure 3: Photo de groupe et logo de la campagne. Le village temporaire de containers accueillant les instruments et le mât de 213m de haut sont visibles en arrière-plan.

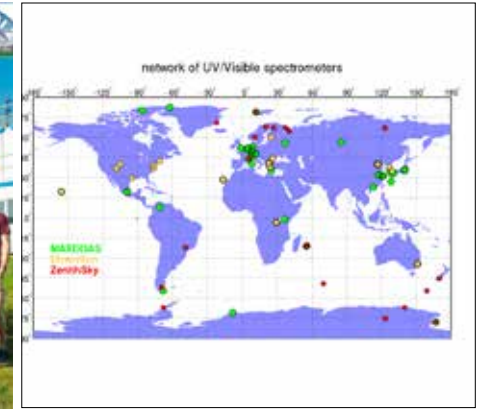


Figure 4: Distribution globale des stations de mesure DOAS, classifiées selon la géométrie de visée des instruments.

La validation des mesures satellitaires de composition atmosphérique repose sur l'acquisition de données de référence dans le cadre de réseaux mondiaux de surveillance tels que le NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change). Les instruments utilisés dans ces réseaux doivent être régulièrement intercalibrés les uns par rapport aux autres pour assurer la qualité et la cohérence de ces données de référence. Ceci est d'autant plus nécessaire que les systèmes de mesure utilisés sont généralement développés de manière indépendante tant du point de vue instrumentation que pour l'analyse des données. A titre d'exemple, la figure 2 illustre la grande diversité des systèmes de mesure par Spectroscopie d'Absorption Optique Différentielle (DOAS) existants (voir également encadré DOAS).

C'est dans ce contexte que la campagne CINDI-2 (Second Cabauw Intercomparison Campaign for Nitrogen Dioxide measuring Instruments) a été organisée sur le site météorologique de Cabauw, aux Pays-Bas. Une campagne similaire avait déjà eu lieu en 2009 au même endroit. Un grand nombre d'instruments de mesure appartenant à 26 instituts de recherche provenant de 17 pays européens et non-européens ont été déployés sur le site CESAR (voir encadré). Ceux-ci incluent différents systèmes DOAS tels que les Multi-AXis (MAX-), mobile-, imaging (I-), cavity-plan-

hanced (CE-) et long-path (LP-) DOAS, ainsi que des instruments auxiliaires comme les analyseurs in-situ, ballons sondes, LIDAR et photomètres solaires. Les principaux objectifs de la campagne CINDI-2 sont: (1) l'évaluation des performances, notamment en termes d'exactitude et précision, de l'ensemble des instruments de type MAX-DOAS, et (2) la caractérisation de la variabilité spatiale et temporelle de polluants atmosphériques importants tels que le dioxyde d'azote (NO_2), le formaldéhyde (HCHO) et les aérosols. Ces instruments sont déployés dans des sites de surveillance de la composition atmosphérique répartis dans le monde (voir en figure 4 la carte globale des stations de surveillance DOAS) et sont, entre autres, utilisés pour la validation satellitaire. L'évaluation de leurs performances est effectuée au moyen d'une comparaison dite 'semi-aveugle' (voir encadré).

Instruments MAX-DOAS et validation des observations satellitaires

La mesure de type MAX-DOAS (voir encadré DOAS) est basée sur la quantification, au moyen d'un spectromètre, de l'absorption spécifique de la lumière solaire transmise et/ou diffusée par l'atmosphère par des polluants tels que le dioxyde d'azote (NO_2), l'ozone (O_3) ou le formaldéhyde (HCHO). Elle révèle l'épaisseur de la couche de ces polluants.

Exercice d'intercomparaison semi-aveugle

Pendant CINDI-2, un exercice d'intercomparaison semi-aveugle a eu lieu, avec comme but de caractériser les différences entre les observations effectuées par un grand nombre de systèmes MAX-DOAS opérant à travers le monde et de contribuer ainsi à une harmonisation des paramètres de mesure et des méthodes d'analyse. Semi-aveugle signifie que les résultats des mesures et analyses sont fournis à un référent indépendant qui compare quotidiennement les différents ensembles de

données tout en maintenant les résultats anonymes (voir figure 5). Le référent communique avec les groupes dont les données montrent une différence significative par rapport aux autres participants, afin de vérifier l'utilisation des bons paramètres de mesures et l'absence de problèmes éventuels. À la fin de la phase semi-aveugle formelle (durée typique : 2 semaines), les noms des groupes sont rendus publics et les écarts de mesure enregistrés par rapport à un instrument de référence ou à une moyenne de plusieurs instruments sont discutés.

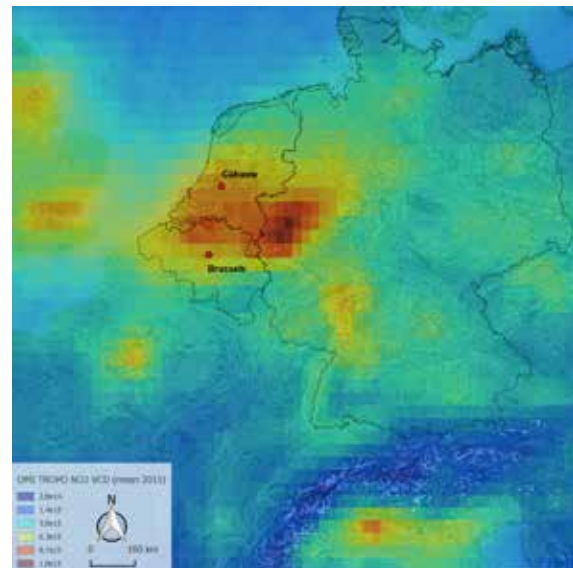
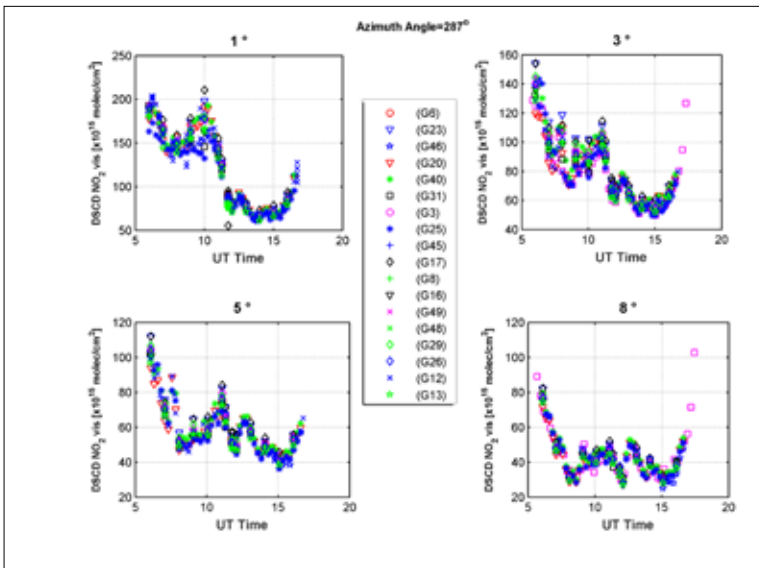


Figure 5: Illustration des résultats d'intercomparaison MAX-DOAS NO_2 pour plusieurs angles d'élévation, le 24/9/2016. En suivant la procédure semi-aveugle, un code est donné à chaque instrument.

Figure 6: Distribution moyenne du NO_2 en Europe occidentale en 2015, comme observée par l'instrument satellitaire OMI. Le nord de la Belgique et le sud des Pays-Bas figurent parmi les zones les plus polluées d'Europe. Les sources sont principalement liées à la forte densité de population et au trafic connexe, ainsi qu'au transport d'émissions industrielles dans la région Rhin-Ruhr en Allemagne.

La lumière est collectée au moyen d'une fibre optique pointant successivement au-dessus de l'horizon et à la verticale de l'instrument (zénith). Cette configuration permet d'isoler le NO_2 anthropique proche du sol, de la couche naturelle dans la stratosphère. De plus, la technique MAX-DOAS mesure l'abondance de polluants dans des masses d'air qui sont représentatives des observations satellitaires (c'est-à-dire qui présentent des résolutions verticale et horizontale similaires), ce qui la rend particulièrement adéquate pour la validation satellitaire. Les instruments MAX-DOAS sont aussi l'outil idéal pour faire le lien entre les données satellitaires et les mesures de concentration de surface de polluants faites par les réseaux de surveillance de la qualité de l'air (comme IRCEL-CELINE en Belgique).

Dans la figure 6, on peut constater que la Belgique est une des zones d'Europe les plus polluées par le NO_2 , avec les Pays-Bas, l'Allemagne, le bassin londonien et la Plaine du Po, c'est-à-dire des régions où la densité de population et le trafic routier sont très denses. Les mesures satellitaires présentent l'avantage d'offrir une couverture globale sur de longues périodes mais elles souffrent aussi d'une résolution spatiale limitée, de l'ordre de 10 km (la taille du pixel de l'instrument OMI, qui a actuellement la résolution spatiale la plus élevée, est de $13 \times 24 \text{ km}^2$), ce qui ne permet pas d'apprécier la distribution spatiale à l'intérieur d'une ville, là où précisément les concentrations en polluants sont les plus importantes. En outre, les mesures satellitaires actuelles sont réalisées à heures fixes à partir d'orbites héliosynchrones, ne permettant donc pas d'étudier les variations diurnes du NO_2 , et de par exemple, caractériser les concentrations maximales associées aux heures de pointes. Ceci sera par contre possible avec les nouvelles générations d'instruments satellitaires ayant une meilleure

résolution spatiale et opérant à partir d'orbites géostationnaires, tel que Sentinel 4 au-dessus de l'Europe à partir de 2021, TEMPO au-dessus des Etats-Unis et GEMS au-dessus de l'Asie.

Instruments auxiliaires et synergie avec les MAX-DOAS

Le NO_2 est un polluant clé qui a des effets nocifs importants sur la santé humaine et des concentrations très variables. Pour étudier la distribution spatiale et temporelle du NO_2 , plusieurs systèmes de mesure ont été utilisés pendant la campagne CINDI-2 en synergie avec les instruments MAX-DOAS. Une sélection de ces instruments est présentée à la figure 7. Les mesures DOAS effectuées par des systèmes compacts opérant à partir de voitures ou vélos (voir figure 8) fournissent des informations précieuses sur la variabilité horizontale du NO_2 et sont comparées aux mesures faites dans plusieurs directions azimutales par les instruments MAX-DOAS fixes. D'autre part, les lancements de ballons sondes NO_2 et les mesures LIDAR fournissent des informations cruciales sur la répartition verticale du NO_2 dans l'atmosphère et peuvent être comparées avec les profils obtenus à partir des instruments MAX-DOAS. Ces informations sur le profil sont nécessaires pour convertir les colonnes atmosphériques de NO_2 (provenant par exemple des observations par satellite) en concentrations de surface. Ces dernières sont fortement liées à la qualité de l'air au sens strict, car les personnes sont directement exposés aux polluants des basses couches de l'atmosphère. Les capteurs in situ échantillonnent l'air (ils 'sentent' l'air) et mesurent la concentration locale de façon directe. Plusieurs capteurs ont été installés dans la tour de mesures météorologiques installée à Cabauw (voir encadré Observatoire CESAR), échantillonnant l'air à différentes altitudes et fournissant des concentrations de NO_2 précises pour la couche atmosphérique la plus basse.



Figure 7: Mosaïque de différents instruments utilisés pendant CINDI-2. De gauche à droite, de haut en bas: IASB-BIRA MAX-DOAS, ensemble de capteurs in situ (NO_2 , SO_2 , O_3 , etc.), IASB-BIRA BikeDOAS, IASB-BIRA Aeromobil, IASB-BIRA senseur à NO_2 , KNMI radiosonde NO_2 , RIVM mobile LIDAR.



Figure 8: Carte de distribution du NO_2 basée sur les mesures d'un instrument DOAS compact monté sur un vélo.

L' Observatoire CESAR

La campagne CINDI-2 a eu lieu sur le site CESAR (Cabauw Experimental Site for Atmospheric Research), situé dans la région d'Utrecht dans la partie occidentale des Pays-Bas. Il comporte un mât de 213 m de haut, spécialement construit pour les observations météorologiques et la recherche atmosphérique. Ce site est utilisé pour la surveillance à long terme et l'étude de tendance des constituants chimiques de l'atmosphère terrestre ainsi que des paramètres météorologiques. C'est également un site de référence pour valider les observations spatiales et développer et mettre en œuvre de nouvelles techniques de mesure.

Le dioxyde d'azote, un polluant important

Le dioxyde d'azote (NO_2) est un gaz en trace atmosphérique et un polluant clé qui mérite une attention considérable: (1) le NO_2 est un indicateur de la pollution atmosphérique en général, car son abondance coïncide en grande partie avec toute une gamme d'autres polluants; (2) des études récentes de l'Organisation Mondiale de la Santé ont montré que l'exposition au NO_2 peut avoir un impact direct sur la santé, (3) c'est un précurseur de la formation de l'ozone (O_3) troposphérique et des particules fines et il affecte donc indirectement le système climatique. En milieu urbain, le NO_2 provient principalement de sources anthropiques, telles que la combustion de matières fossiles, liée à la fois aux activités industrielles et à la circulation automobile. Le NO_2 est un polluant à caractère local très marqué et présente des concentrations très variables dépassant souvent les limites fixées par la législation européenne. Le nord de la Belgique et le sud des Pays-Bas figurent parmi les zones les plus polluées d'Europe (voir figure 6).

Les auteurs

Gaia Pinardi, Frederik Tack, François Hendrick, Jeroen van Gent et Michel Van Roozendaal sont chercheurs à l'Institut royal d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB-BIRA).

Plus

Cabauw Experimental Site for Atmospheric Research (CESAR): <http://www.cesar-observatory.nl>
 Campagne CINDI-2: <http://www.tropomi.eu/science/cindi-2>
 Le groupe DOAS de l'IASB-BIRA: <http://uv-vis.aeronomie.be>
 ESA: <http://www.esa.int>
 ESA Sentinels: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview4
 Netherlands Space Office (NSO): <http://www.spaceoffice.nl>
 NDACC: <http://www.ndsc.ncep.noaa.gov>
 IRCEL/CELINE: <http://www.irceline.be>

Remerciements

CINDI-2 a été financée par l'ESA (projets FRM4DOAS et CINDI-2) et l'Agence spatiale néerlandaise (NSO). Nous remercions également Arnoud Apituley (KNMI) et son équipe qui ont organisé localement la campagne et sa logistique, ainsi que nos collègues de l'IASB-BIRA Alexis Merlaud, Caroline Fayt, Christian Hermans et Cléo Gielen, et toutes les universités et instituts participants.