

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Apport de l'imagerie hyperspectrale pour l'étude du NO₂ atmosphérique

Référence : **PHY-DOTA-2025-19**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 01/10/2025

Date limite de candidature : 30/04/2025

Mots clés :

imagerie hyperspectrale, NO₂, qualité de l'air, télédétection, physique de l'atmosphère

Profil et compétences recherchées :

optique, physique atmosphérique

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif :

Contexte :

La qualité de l'air est un paramètre fondamental au regard de la santé publique. Un des paramètres permettant de juger de l'amélioration de la qualité de l'air est la concentration de NO₂ dans l'air. Le NO₂ est lié à la production de NO par le processus de combustion dans l'air. Cette molécule est donc un traceur de la production d'énergie pour l'activité humaine : chauffage, transport, électricité.

La plupart des pays développés ont implémenté des politiques d'amélioration de la qualité de l'air. Pour le NO₂, elles passent principalement par l'élimination des vieux moteurs diesel, et l'arrêt des centrales à charbon. Les satellites d'observation de la qualité de l'air démontrent des améliorations notables dans de nombreux endroits du monde.

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a récemment abaissé les seuils de tolérance d'exposition de la population au NO₂ (WHO, 2021). Cet abaissement démontre une prise de conscience des effets néfastes de cette molécule sur l'organisme : les problèmes respiratoires et cardiaques sont au premier rang des effets constatés. De nombreuses villes en France et ailleurs comptent de nombreux jours de dépassement de ces seuils constatés sur base des mesures in situ.

Des recherches récentes ont démontré à quel point le NO₂ peut être distribué de manière inhomogène à travers les agglomérations. Les conditions météo, la répartition des sources, la présence d'axes routiers importants, et les caractéristiques urbanistiques (canyons urbains) déterminent la distribution du NO₂ dans les villes (Lauriks, 2022). Cette réalité est très mal capturée par les réseaux d'instruments de mesure de la qualité de l'air officiels qui sont déployés en trop petite quantité. Les satellites n'arrivent pas non plus à combler ce vide à cause de la trop faible résolution spatiale actuellement atteignable : Sentinel-5P, la dernière génération de satellite d'observation de la qualité de l'air, n'offre qu'un échantillonnage d'environ 20km².

En dehors des villes, ce sont les centrales thermiques et les industries pétrochimiques qui peuvent affecter la qualité de l'air de zones rurales. Mieux observées par les satellites, l'estimation des émissions de ces sources est souvent basée sur le *self-reporting*, laissant subsister une incertitude sur la réalité des chiffres auto-proclamés (Beirle, 2023).

La mise au point de techniques innovantes permettant d'appréhender la variabilité des champs urbains de NO₂ ou les émissions réelles des sources industrielles permettrait de mieux connaître la situation réelle.

Différents réseaux d'instruments de télédétection de la composition atmosphérique accomplissent des tâches de monitoring du NO₂. Deux types d'instruments effectuent la majorité des mesures de NO₂ : le MAX-DOAS, et le PANDORA. L'un et l'autre collectent la lumière à l'aide d'une fibre optique pour éclairer un réseau de diffraction séparant les composantes du spectre visible dans la gamme 400-500nm. Leur produit scientifique primaire est une colonne intégrée de NO₂ sur une distance de plusieurs km orientée suivant un azimut et une élévation donnés. En variant la direction de visée, on peut tenter d'observer la variabilité spatio-temporelle du NO₂ (Figure 1).

Toutefois, l'échantillonnage spatial et temporel de leurs mesures ne permet pas de capturer la variabilité du champ de NO₂ en ville, et encore moins de mesurer les émissions d'une source industrielle dont le panache est encore plus dynamique.

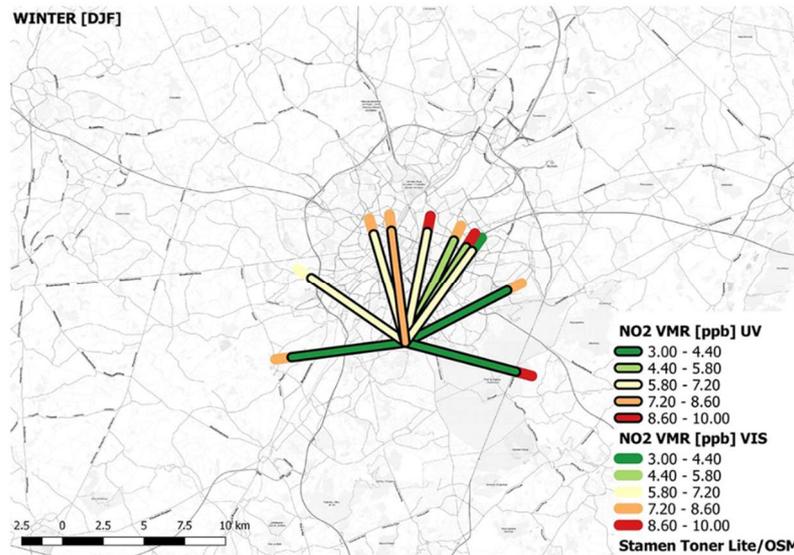


Figure 1 : Mesures moyennes de la concentration en NO₂ proche du sol par un instrument de type MAX-DOAS basé à l'IASB (Uccle, sud de Bruxelles). Les lignes de visées ont été orientées de manière à couvrir la région bruxelloise. La couleur représente le rapport de mélange du NO₂ moyenné sur la longueur du chemin optique de l'instrument. [Dimitropoulou et al. Atmos. Meas. Tech. 13, 2020].

Ces instruments sont aussi utilisés pour valider les mesures satellitaires. Malheureusement, la géométrie d'observation et l'échantillonnage sont tellement différents que les comparaisons sont extrêmement difficiles (Erreur ! Source du renvoi introuvable.).

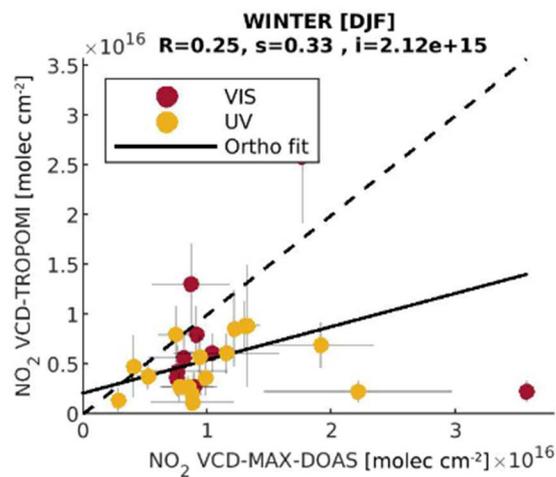


Figure 2 : Corrélation entre les mesures de NO₂ par le MAX-DOAS de Uccle, et les mesures par TROPOMI (Sentinel-5P) lors de ses passages au-dessus de Bruxelles. [Dimitropoulou et al. Atmos. Meas. Tech. 13, 2020].

De leur côté, les satellites n'offrent pas la résolution nécessaire pour appréhender la diversité de qualité de l'air des quartiers. L'exemple ci-dessous (Figure 3) montre ce que Sentinel-5P a mesuré comme colonnes moyennes verticales de NO₂ troposphérique dans la région de Bruxelles pour le mois de janvier 2024. L'autre figure montre le résultat d'une expérience de science participative citoyenne menée en 2022 à Bruxelles. Les points de couleurs représentent la concentration locale en NO₂. On peut observer à quel point les structures spatiales ne sont pas résolues par le satellite.

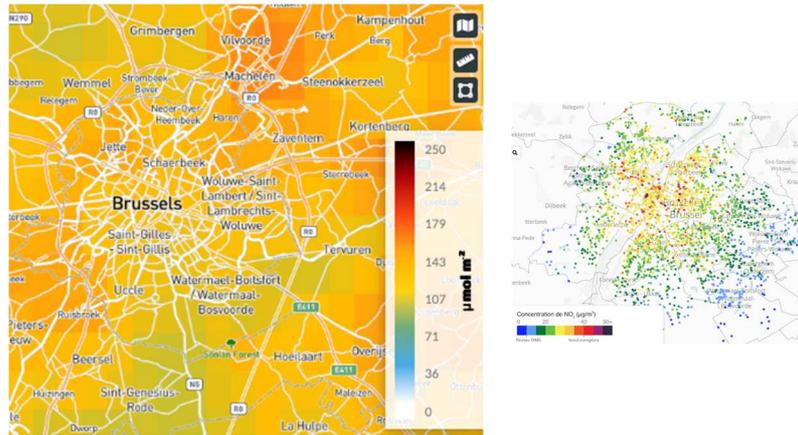


Figure 3 : Gauche: Colonnes verticales troposphériques de NO₂ mesurées en janvier 2024 par Sentinel-5P (source: terrascope.be). Droite: Concentrations moyennes en NO₂ pour le mois de novembre 2022 mesurée en façade de 3000 foyers Bruxellois (source: curieuzenair.brussels).

Peu de développements instrumentaux ont tenté de combler le manque laissé d'une part par les instruments au sol et leur échantillonnage trop localisé, et d'autre part les satellites et leur échantillonnage trop grossier. La seule exception est un imageur hyperspectral développé par l'IASB (Dekemper, 2016). Utilisant un filtre acousto-optique, il possède un champ de vue de 20°x20° et peut faire une mesure du champ de NO₂ toutes les minutes. La Figure 4 montre une mesure du champ de NO₂ effectuée dans la région de Rome en mars 2024.

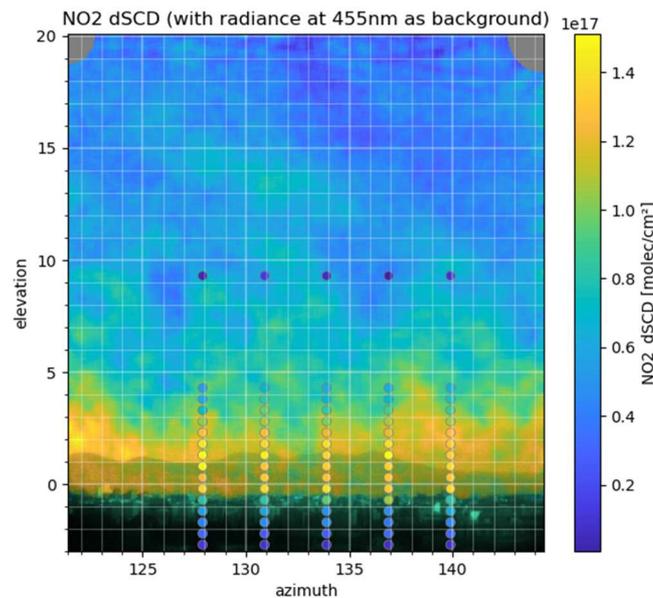


Figure 4 : Champ de NO₂ mesuré par la « camera NO₂ » depuis le toit de l'université Sapienza dans le centre de Rome. Chaque pixel a effectué une mesure de la colonne intégrée de NO₂ dans sa ligne de visée. Le code couleur représente la valeur de cette colonne. Les points en surimpression représentent les mesures effectuées au même moment par un MAX-DOAS.

L'instrument a également permis de visualiser le champ de NO₂ dans les fumées de cheminée d'une centrale à charbon (Figure 5).

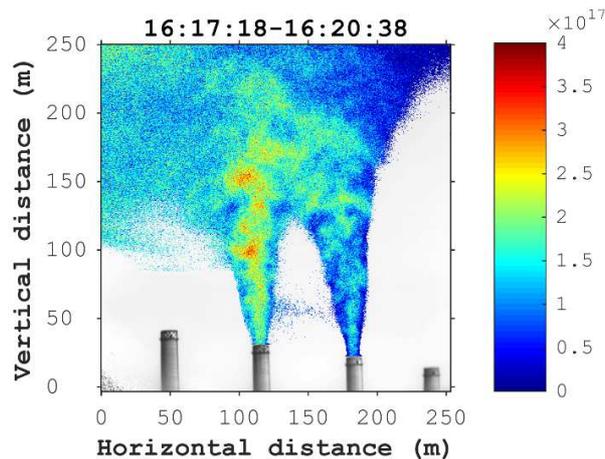


Figure 5 : Champ de NO_2 mesuré par la « caméra NO_2 » placée à 2,5km de la centrale à charbon de Turceni, Roumanie. [Dekemper, 2016].

Cet instrument démontre que l'imagerie hyperspectrale permet d'atteindre les objectifs d'échantillonnage spatial de sources ponctuelles (industrie) ou étendues (villes). Toutefois, le filtre acousto-optique sur lequel le concept instrumental repose nécessite de scanner en longueur d'onde, ce qui prend du temps, et rend la mesure sensible à des variations soudaines d'éclairement ou de la scène elle-même. Un instrument capable d'acquérir la partie nécessaire du spectre en un « snapshot » permettrait de surmonter cette difficulté.

Une caméra de type « multicam » serait ainsi adaptée à la mesure du NO_2 dans ce contexte. Une telle caméra repose sur l'association d'une matrice mini-lentilles et d'un filtre spectral « mosaïque » ou « en coin » (c'est-à-dire dont la caractéristique spectrale varie selon une direction spatiale). La matrice de lentilles forme sur le détecteur une série d'images de la scène, et, grâce au filtre spectral placé devant le détecteur, chacune de ces imagerie porte une information spectrale différente (voir la Figure 6). En reconstituant ces imagerie entre elles, on obtient le cube hyperspectral recherché, qui est mesuré à la cadence d'acquisition du détecteur.

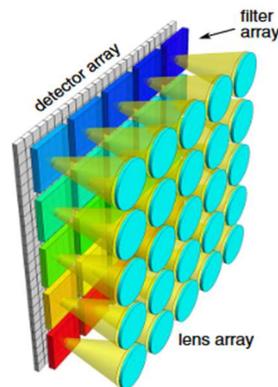


Figure 6 : Principe d'une caméra hyperspectrale « multicam ». Ici, l'élément spectral est une matrice de filtres « mosaïque », dans la thèse il s'agira d'un interféromètre pour lequel la différence de marche varie selon la hauteur du rayon incident. [image extraite de N. Hagen & M. Kudenov, « Review of snapshot spectral imaging technologies » Opt. Eng. (2013)].

Si on utilise un filtre étroit, le flux reçu par le détecteur sera d'autant plus faible que le filtre est fin (c'est-à-dire que la résolution spectrale est élevée). Il est donc avantageux de remplacer le filtre par un interféromètre à deux ondes, pour bénéficier de « l'avantage multiplex » de la spectrométrie par transformée de Fourier. Avec un interféromètre biréfringent, formé simplement d'un empilement de lames ou prismes biréfringents, on obtient un montage très compact, et donc plus facile à stabiliser mécaniquement ou thermiquement [Porte, 2022]. La Figure 7 montre une telle caméra, sensible dans la bande [525-850]nm avec une résolution spectrale d'environ 5nm. Une adaptation de cette caméra pour atteindre une résolution spectrale meilleure que le nanomètre serait tout à fait adaptée à la mesure de panaches dynamiques de NO_2 .

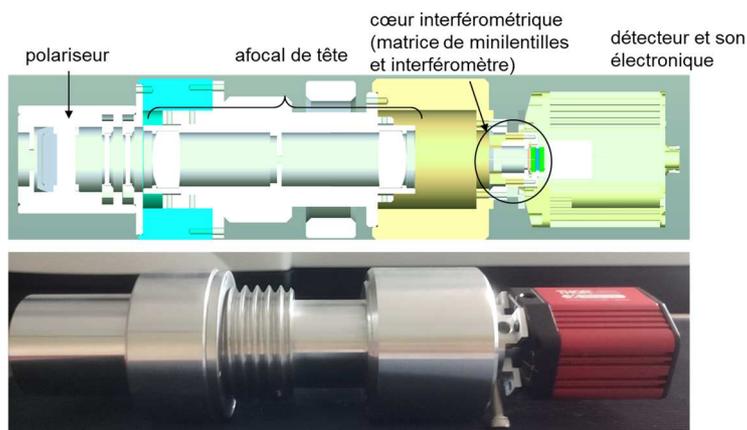


Figure 7 : Caméra hyperspectrale « snapshot » utilisant un interféromètre biréfringent développée dans le cadre de la thèse Cnes/Onera de Matthieu Porte [Porte, 2024].

Objectifs de la thèse :

Comme présenté ci-dessus, il y a un écart important entre ce que permettent les instruments au sol (mesures très localisées des stations de qualité de l'air et des instruments de télédétection) et les satellites de mesure de la qualité de l'air. Pourtant, il existe un besoin pour des mesures à haute résolution spatio-temporelle de champs bidimensionnels de NO₂, que ce soit pour appréhender la variabilité de l'exposition au NO₂ dans les villes, ou pour vérifier les émissions de grandes sources industrielles.

Dans ce but, les objectifs scientifiques de la thèse sont les suivants :

1. Développer une caméra hyperspectrale « snapshot » reposant sur un interféromètre biréfringent, avec comme objectif l'acquisition de cubes hyperspectraux dans la gamme spectrale [440-450] nm avec une résolution spectrale d'environ 1nm, un champ de vue de minimum 20°x10° échantillonné par 50x25 pixels.
2. Développer une chaîne complète de traitement des mesures de ce nouvel instrument afin de retirer une distribution bidimensionnelle du NO₂ dans un panache industriel ou dans une scène urbaine, et quantifier les seuils de détection de l'instrument à partir d'un budget d'erreur complet.
3. Valider les mesures de NO₂ du nouvel instrument avec la caméra NO₂ de l'IASB, et un instrument MAX-DOAS de référence.

Bibliographie :

Beirle, S., et al., 2023. « Improved catalog of NO_x point source emissions (version 2) ». *Earth Syst. Sci. Data* 15, 3051–3073. <https://doi.org/10.5194/essd-15-3051-2023>

Dekemper, E., et al., 2016. « The AOTF-based NO₂ camera ». *Atmos. Meas. Tech.* 9, 6025–6034. <https://doi.org/10.5194/amt-9-6025-2016>

Dimitropoulou, E., et al., 2020. « Validation of TROPOMI tropospheric NO₂ columns using dual-scan multi-axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS) measurements in Uccle, Brussels ». *Atmos. Meas. Tech.* 13, 5165–5191. <https://doi.org/10.5194/amt-13-5165-2020>

Lauriks, F., et al., 2022. « CurieuzenAir: Data collection, data analysis and results. » 50 p. University of Antwerp.

Porte, M., et al., 2022. « Birefringent interferometer for compact snapshot hyperspectral imaging ». *International Conference on Space Optics - ICSO 2022, Oct 2022, Dubrovnik, Croatia*. pp.1277770, <https://doi.org/10.1117/12.2691369>

Porte, M., et al., 2024. « Experimental performance of a snapshot hyperspectral imaging system with a birefringent interferometer ». *International Conference on Space Optics - ICSO 2024, Oct 2024, Antibes, France*

« WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide ». *Executive summary*. Geneva: World Health Organization; 2021.

Collaborations envisagées :

BIRA/IASB (Belgique)

Laboratoire d'accueil à l'ONERA :

Département : Optique et Techniques Associées

Lieu (centre ONERA) : Palaiseau

Contact :

Tél. : +33 (0)1 80 38 64 16 Email : yann.ferrec@onera.fr

Directeur de thèse :

Nom : Emmanuel Dekemper

Laboratoire : BIRA/IASB

Tél. : +32 (0)2 373 03 85

Email : emmanuel.dekemper@aeronomie.be

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>