

SUIVI DE LA QUALITE DE L'AIR DANS LA VILLE DE KINSHASA PAR MESURES MOBILES DU NO₂ ATMOSPHERIQUE EN DIFFERENTS POINTS GEOGRAPHIQUES

MONITORING OF AIR QUALITY IN KINSHASA BY MOBILE ANALYSES OF ATMOSPHERIC NO₂ IN DIFFERENT GEOGRAPHICAL LOCATIONS

YOMBO PHAKA Rodriguez^{1,3}, HOLENU MANGENDA Holy², VUNI SIMBU Alexis², BAKAMBANA NDAMBI Ruffin², MUYULU Rosine² et ALONI KOMANDA Jules²

¹Université de Kinshasa, Faculté des Sciences/Dpt de Physique, Kinshasa, RDC

²Université de Kinshasa, Faculté des Sciences/Dpt de GéoScience, Kinshasa, RDC

³Institut d'Astrophysique et de Geophysique, UR SPHERES, Université de Liège, Liège, Belgique

Auteur correspondant : HOLY JOSEPH Holenu; holyholenu@gmail.com

RESUME

Cette étude porte sur la question de la qualité de l'air dans la ville de Kinshasa, capitale de la République Démocratique du Congo (RDC). Elle est basée sur l'étude de la répartition spatiale des espèces en trace comme le NO₂ et le CO dans cette ville. Les deux espèces ciblées dans cette étude, sont les marqueurs de la dégradation de la qualité de l'air tel que promu par l'Organisation Mondiale de la Santé. La surveillance en temps réel de la concentration chimique de ces espèces est fortement recommandée. Les données brutes ont été collectées pendant trois jours, en effectuant des mesures mobiles à bord d'un véhicule. La colonne de NO₂ a été prélevée grâce au système DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) et sa répartition spatiale a été réalisée grâce aux levés GPS. Le résultat de cette étude a montré que les communes de Limete et de la Gombe (tronçon poids lourds) sont beaucoup plus frappées par la pollution en NO₂, suivi des grands carrefours avec des zones d'animation commerciale intense comme à la commune de Mont ngafula (marché Matadi mayo) ou au rond-point Ngaba. La concentration en CO a été prélevée grâce à un capteur low cost, donnant des mesures in situ. L'instrument utilisé étant de faible sensibilité, l'analyse quantitative de CO n'a pas été effectuée. Néanmoins, le signal de CO a été détecté dans presque toutes les communes de la ville de Kinshasa.

MOTS-CLES : Pollution de l'air ; Qualité de l'air ; NO₂, mesures DOAS, Ville de Kinshasa.

ABSTRACT

This study addresses the issue of air quality in the city of Kinshasa, capital of the Democratic Republic of Congo. It is based on the study of the spatial distribution of trace species such as NO₂ and CO in the communes of the city. The two species targeted in our study are the major contributors to the degradation of air quality as promulgated by the World Health Organization. Real-time monitoring of the chemical concentration of these species is highly recommended. Raw data were collected over three days, using mobile measurements in a car. The chemical concentration of NO₂ was sampled using the DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) system and its spatial distribution was carried out using GPS surveys. The result of our study showed that the commune of Limete and La Gombe (heavy goods vehicle road) are much more affected by NO₂ pollution, followed by large crossroads with areas of intense commercial activity such as the commune of Mont ngafula (Matadi mayo market) or the Ngaba traffic circle. The CO concentration was sampled using a low cost sensor, giving in situ measurements. The instrument used being of low precision, the quantitative analysis of CO was not done. Nevertheless, the CO signal was detected in almost all communes of the city of Kinshasa.

KEYWORDS: Air pollution; Air quality; NO₂; DOAS measurements; Kinshasa city

1. INTRODUCTION

Tout comme l'eau et le sol, l'air est un élément essentiel et vital pour tout être vivant (A. Vennin, 2000). La question de sa qualité est d'une importance planétaire, mais en Afrique cette question est peu ou pas du tout abordée. Or d'après l'Organisation Mondiale de la Santé « OMS », la pollution de l'air est à l'origine de près de 200.000 décès chaque année en Afrique (WHO, 2016). Si cette question sur la dégradation de la qualité de l'air reste pendante, le continent Africain atteindrait 600.000 décès en 2050. D'après la dernière base de données sur la qualité de l'air en milieu urbain, 98 % des villes de plus de 100 000 habitants dans les pays à faible revenu ne respectent pas les lignes directrices de l'OMS relatives à la qualité de l'air (IQAir, 2020). Les lignes directrices de l'OMS en rapport avec l'évaluation de la qualité de l'air sont basées sur le contrôle et la surveillance en temps réel de la concentration chimique des polluants comme les particules matières (PM), l'ozone (O₃), le dioxyde d'azote (NO₂), le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de soufre (SO₂), le plomb (Pb) et autres. Les seuils en concentrations moyennes de ces polluants de l'air sont règlementés et publiés chaque année dans les différents rapports de l'OMS. La concentration annuelle de NO₂ ne doit pas dépasser la valeur de 40 µg/m³ (WHO, 2006) et l'exposition à des longues durées à ce seuil conduit à des maladies respiratoires et cardiovasculaires. La norme pour l'Union européenne est fixée à 40 µg/m³. Ce polluant de l'air a plusieurs sources d'émissions, dont les principales sont le trafic routier intense et les feux de biomasses.

Kinshasa, capitale de la République Démocratique du Congo « RDC », ville de près de 12 millions d'habitants (UN, 2016), est aussi fortement frappée par la pollution de l'air comme le signale les rapports de l'OMS (WHO, 2019). La signature saisonnière du NO₂ est marquée par un pic en saison sèche, observé depuis le satellite dans l'atmosphère de Kinshasa au cours des dernières années. Cette pollution en NO₂ dans la ville de Kinshasa a été aussi observée depuis le sol par Yombo et al. (2021) qui confirme aussi les pics en saison sèche. Dans cette ville, on observe de forts embouteillages, pendant les heures de grand trafic automobile et le soir au coucher du soleil. Le trafic routier est intense dans la ville de Kinshasa, avec presque 90 % de vieux véhicules en mauvais état, ne disposant pas de pot catalytique ni d'autres dispositifs d'épuration de gaz. Et ces véhicules utilisent de l'essence produite par la Compagnie Nationale de Raffinage (CORAF) avec une teneur en plomb égale à 0,10 g/l, or il n'existe pas de seuil en-dessous duquel l'exposition au plomb n'aurait pas d'effets nocifs (WHO, 2019).

Jusqu'à aujourd'hui les problèmes de dégradation de la qualité de l'air ont été très peu pris en compte par les populations, les chercheurs et les autorités de Kinshasa. Le pouvoir publique ne prend presque aucune décision allant dans le sens de freiner ce fléau qui a pourtant un impact négatif démontré pour la santé de la population et sur l'environnement. La ville ne dispose même pas d'une stratégie de collecte de données en rapport avec la pollution de l'air. Or, la gestion d'un problème comme celui de la pollution de l'air passe obligatoirement par une bonne connaissance du phénomène qui, selon les régions, varie. Cette connaissance passe par une collecte de données, lesquelles seront utilisées principalement pour mener des études, qui par la suite serviront dans le domaine de la prévention et de la gestion des épisodes de pics de pollutions (Yombo et al., 2021).

Depuis Mai 2017, un système de télédétection atmosphérique a été installé sur le toit de la faculté des Sciences de l'Université de Kinshasa (UniKin) dans le cadre d'une collaboration avec l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB). Cet instrument fournit des observations qui, après analyse et traitement, renseignent sur les densités de la colonne verticale troposphérique (VCDT : vertical column density tropospheric) de quelques molécules traces dont le NO₂. La première étude basée sur cet instrument a été publiée par Yombo et al. (2021) montrant le cycle saisonnier de cette molécule avec une valeur moyenne de VCDT estimée à 3×10^{15} molécules cm⁻² entre 2017 et 2019. Le présent article vient donc en complément aux observations faites avec l'instrument statique précité. Il présente les observations et mesures mobiles collectées en parcourant différents itinéraires routiers de la ville. L'objectif est de faire un état de lieu sur les situations existantes dans différents lieux de la ville pouvant affecter la qualité de l'air. Une campagne de 3 jours d'observations et mesures atmosphériques a été menée dans la ville de Kinshasa en utilisant des instruments de spectroscopie d'absorption optique différentielle (DOAS : Differential Optical Absorption Spectroscopy) mobiles. Les instruments DOAS sont largement utilisés par la communauté scientifique du monde entier pour mesurer les colonnes verticales troposphériques.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Zone d'étude

La ville de Kinshasa a aujourd'hui la forme d'une tortue géante dont la tête constitue la partie urbanisée comprenant 22 communes avec une superficie totale est de 590 km² qui représente seulement 6% de la superficie totale. Les 94 % qui restent du corps représentent les deux communes urbano-rurales lesquelles s'étendent sur environ 9375 km². Il s'agit de

N'sele et Maluku plus une partie de la commune du Mont Ngafula, dans sa moitié Sud (Yina, 2016). Elle est située entre 4°00' et 5°00' de latitude sud et entre 15°00' et 15°30' de longitude est avec (Elle est bornée) au nord le fleuve Congo et le territoire de Mushie, au nord-est par les territoires de Bagata et de Kenge, au sud les territoires de Popokabaka, Kimvula et Madimba, et à l'ouest le territoire de Kasangulu (Figure 1).

2.2. Matériels et méthodes de mesures

Les mesures mobiles de teneurs en NO₂ dans l'air ont été effectuées dans la ville de Kinshasa pendant 2 jours du mois de Novembre 2019 (14 et 16ème jour, jeudi et samedi, soit un jour de semaine et le week-end). Des mesures de CO ont également été réalisées sur 1 journée du mois de Février 2020 (6ème jour). Malheureusement l'appareillage utilisé était trop peu sensible pour produire des résultats exploitables.

Les mesures ont été réalisées selon l'itinéraire indiqué à la Fig. 1 en utilisant un équipement mobile embarqué dans une voiture (Fig. 2).

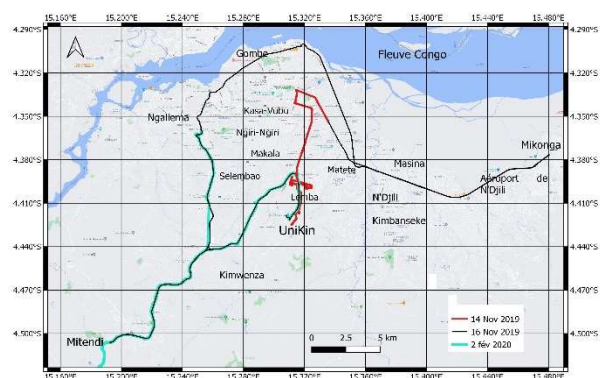


Figure 1 : Carte de la zone étudiée et itinéraires parcourus pour la prise des mesures mobiles.

Les dates et coordonnées géographiques des mesures sont données au Tableau 1.

Tableau 1 : Dates et coordonnées géographiques des mesures (réalisées entre 8h et 17h30 T.U.).

Date	Distance	Communes traversées
14 nov. 2019	7 km	UniKin 4.41°S, 15.31°E limete échangeur 4.22°S, 15.20°E
16 nov. 2019	150km	UniKin 4.41°S, 15.31°E Kasangulu 4.58°S, 15.16°E KitamboMagasin 4.33°S, 15,25°E Gare centrale 4.18°S, 15.19°E Kinkole 4.20°S, 15.30°E
2 fév.2020	70 km	UniKin 4.41°S, 15.31°E Kasangulu 4.58°S, 15.16°E UPN ^a 4.40°S, 15,25°E Lemba super 4.38°S, 15.33°E

a. UPN : Université Pédagogique Nationale

Le dispositif expérimental utilisé dans la prise de mesure du NO₂ est basé sur un spectromètre UV-VIS, un GPS, une fibre optique orientée au zénith et un ordinateur assurant le fonctionnement de tout le système et la sauvegarde des données mesurées chaque minute (Figure 2).



Figure 2 : Système mobile utilisé

Les équipements sont placés à bord d'une voiture permettant de faire les mesures mobiles. Le spectromètre UV-VIS est un spectromètre AVANTES qui couvre la gamme spectrale 290 - 550 nm avec 0.7 nm de résolution. Ce spectromètre est de type Czerny-Turner avec une focale de 75 mm, une fente d'entrée de 50 µm de largeur, et un réseau de 1200 l/mm. Ce type de spectromètre a été choisi pour sa gamme de longueurs d'onde qui correspond à la signature spectrale d'absorption du NO₂. Le spectromètre est directement connecté à un ordinateur qui contrôle l'acquisition et l'enregistrement des spectres. Avec ce système automatisé, nous pouvons enregistrer les données. Pour les mesures du CO, nous avons utilisé un capteur Low cost.

2.3. Traitement des données de mesure

Le logiciel QDOAS a été utilisé pour exploiter les données brutes enregistrées (Fayt et al., 2011). Développé à IASB, ce logiciel procède à un ajustement par moindres carrés multilinéaires permettant de déterminer les colonnes obliques de certaines espèces absorbant le long du trajet optique (Danckaert et al. 2017). Les paramètres de configuration du logiciel QDOAS pour l'analyse de NO₂ sont celles décrites par Van Roozendaal et Hendrick 2012. Le logiciel QDOAS exploite les équations de la spectroscopie d'absorption différentielle (DOAS : Differential Optical Absorption Spectroscopy). L'approche est basée sur la loi de Beer-Lambert qui décrit la relation linéaire entre le coefficient d'absorption d'un signal lumineux qui parcourt un trajet optique dans un milieu et la concentration de l'espèce chimique absorbante que le milieu contient. Comme chaque type de molécule et chaque gaz dispose de sa propre signature spectrale d'absorption optique, il est possible de les identifier et d'en déterminer la concentration. Cette loi établit une relation entre la quantité de lumière absorbée par les

molécules et le nombre de molécules présente dans le champ lumineux selon la relation (1) :

$$C \cdot L = \frac{\ln \left[\frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)} \right]}{\sigma(\lambda)} \quad (1)$$

où I_0 est l'intensité lumineuse incidente de longueur d'onde λ , I est l'intensité de la radiation après passage à travers le milieu absorbant, L est la longueur du trajet optique parcouru par la radiation dans le milieu, c est la concentration considérée uniforme de l'espèce absorbante dans le milieu traversé, et $\sigma(\lambda)$ est le coefficient d'absorption molaire de l'espèce considérée. Si la longueur du chemin optique L est connue, on peut calculer la concentration c de l'espèce le long du chemin optique. Il est à rappeler que dans le cas de l'atmosphère il y a plusieurs espèces présentes absorbantes. La loi de Beer Lambert telle que réellement exploitée dans QDOAS est donc modifiée, pour prendre en compte toutes les conditions physico-chimiques de l'atmosphère. La technique d'analyse est développée de façon approfondie par Danckaert et al. (2017). L'analyse QDOAS nous fournit donc la DSCD qui est la différence entre les densités de colonne oblique totale dans les spectres mesurés (SCD) et le spectre de référence SCD_{ref} :

$$DSCD = SCD - SCD_{ref} \quad (2)$$

La colonne oblique totale nommée SCD est la concentration de gaz intégrée sur le trajet optique dans l'atmosphère. La colonne oblique dépend de la longueur du chemin parcouru, de la géométrie d'observation et des conditions météorologiques (plus ou moins de diffusion selon la couverture nuageuse). On veut en dériver la colonne verticale (VCD pour Vertical Column Density), qui est la concentration de gaz intégrée sur un chemin vertical à travers l'atmosphère. La colonne verticale ne dépend plus du trajet des photons, ni de la géométrie d'observation et est donc la même pour toutes les élévations ; elle peut donc être comparée à d'autres mesures.

On définit le facteur de proportionnalité entre SCD et VCD, par un facteur de masse d'air (AMF : Air Mass Factor) :

$$VCD = \frac{SCD}{AMF} \quad (3)$$

La SCD totale contient la contribution de la partie troposphérique et stratosphérique de l'espèce ciblée. Le NO_2 est présent dans la troposphère tout comme dans la stratosphère. L'expression de la SCD peut donc s'écrire comme la somme de la contribution troposphérique (SCD_{tropo}) et stratosphérique (SCD_{strato}) de la colonne oblique selon l'équation :

$$SCD = SCD_{tropo} + SCD_{strato} \quad (4)$$

En utilisant donc les équations (2) et (3), on peut facilement écrire l'expression (4) et en déduire la quantité recherchée dans notre étude à savoir la colonne verticale troposphérique du NO_2 telle que donnée dans l'équation (5).

$$VCD_{tropo} * AMF_{tropo} = SCD - SCD_{strato} \quad (5)$$

On peut ainsi déduire la quantité recherchée selon l'équation :

$$VCD_{tropo} = \frac{SCD - SCD_{strato}}{AMF_{tropo}} \quad (6)$$

Dans notre étude, nous avons donc exploité l'équation (5) pour extraire les colonnes verticales troposphériques de NO_2 dans les mesures mobiles effectuées dans la ville de Kinshasa. La SCD_{strato} utilisée pour chaque jour de mesure a été déduite des observations du satellite TROPOMI au-dessus de Kinshasa. Les AMF_{tropo} et la SCD_{ref} utilisés dans la présente étude ont été obtenus de la même manière que dans Yombo et al. (2021) qui avait traité à des mesures réalisées dans la même ville. Un algorithme a été donc développé, résolvant l'équation (5) dans l'objectif d'extraire l'information de la concentration verticale troposphérique de NO_2 . Cet algorithme est directement inspiré des recherches menées par Yombo et al. (2021). Le Global Positioning System (GPS) a servi à la localisation du site, de même qu'un décamètre, une boussole, un carnet de terrain. Les logiciels de cartographie Arcgis, Arcmap, Qgis, de traitement de textes (MS Word) et de Graphiques (python) ont été utilisés.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Résultats

Les Figures 3 et 4 montrent les différentes valeurs de NO_2 mesurées les 14 et 16 novembre 2019 dans la ville de Kinshasa. On observe que le premier pic de NO_2 a été enregistré au rond-point Ngaba. Il s'agit un carrefour caractérisé par un trafic routier intense. Le même phénomène a été observé dans tous les autres carrefours de la ville de Kinshasa. Le pic le plus marquant a été enregistré aux alentours de Kingabwa entre 12h30 et 13h10.

Nous avons également effectué le 14 novembre 2019 des mesures dans la commune de Limete quartier industriel. La présence d'industries dans cette zone nous a conduit à faire des mesures statiques pour mieux évaluer l'impact de la présence des activités industrielles dans la chaîne d'émission des polluants de l'air à Kinshasa.

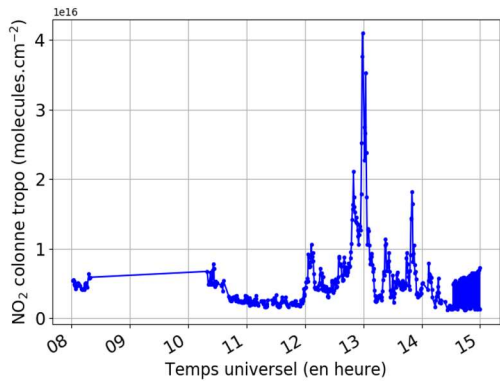


Figure 3 – Colonne verticale troposphérique de NO₂ mesurée dans les communes de la ville de Kinshasa le 16 novembre 2019 entre 8h et 15h T.U.

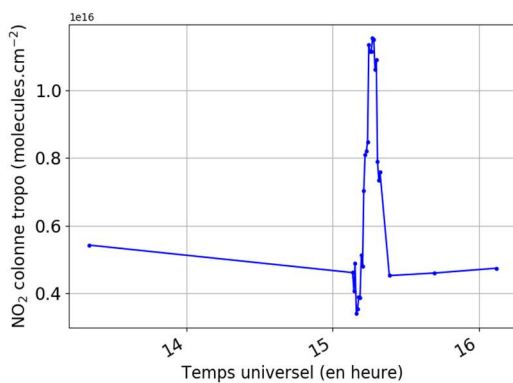


Figure 4– Colonne verticale troposphérique de NO₂ mesurée dans la commune de Masina à Pascal le 14 novembre 2019 entre 13h et 16h TU.

Les résultats montrés sur les Figs. 4 et 5 confirment la forte émission de NO₂ dans cette zone. Les valeurs les plus élevées observées dans cette zone industrielle sont parfois 4 fois supérieures à celles observées dans les autres coins de la ville.

La Fig. 5 montre la distribution spatiale des mesures de NO₂ qui sont présentées en fonction de l’heure de mesure en temps universel (T.U.) dans les Figs. 3 et 4. Cette analyse géographique des concentrations en dioxyde d’azote dans l’air de Kinshasa montre quatre zones identifiées selon les plages de concentrations mesurées. Les zones les plus polluées sont en couleurs rouge et orange. Ces zones sont : Rond-point Ngaba, Marché de Matadi Kibala, le rond-point UPN, le carrefour de Kintambo Magasin, Entrée Poids Lourds, Marché de Liberté. Les valeurs de NO₂ les plus hautes sont comprises entre 2 et 15 × 10¹⁵ molécules cm⁻². Outre les mesures faites sur le NO₂, nous avons aussi effectué des mesures sur le monoxyde de carbone (CO) qui est un indicateur de la qualité de l’air. L’instrument utilisé pour ces mesures étant peu sensible, nous n’avons pas pu produire de mesures quantitatives, mais la présence de CO a bien été observée.

3.2. Discussion

La quantification des sources d’émissions et de leurs contributions dans les observations de pollution atmosphérique nécessite l’utilisation d’outils tels que des modèles de dispersion atmosphérique ou des approches statistiques.

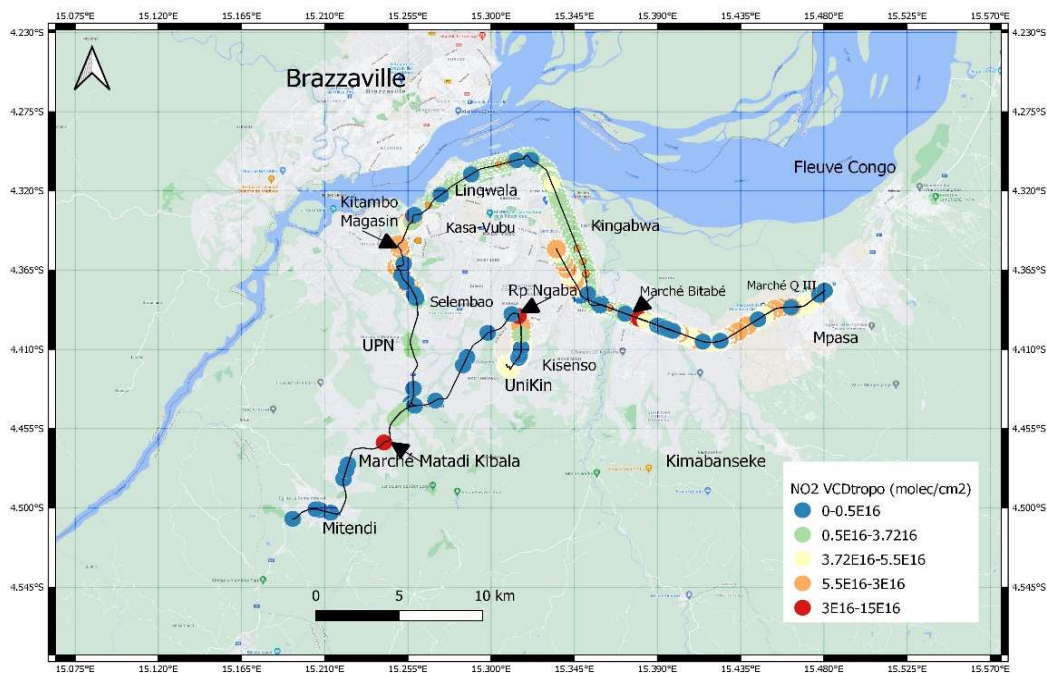


Figure 5 : Niveaux de pollution en NO₂ relevés en différents points de mesure

Nous nous limiterons ici à une discussion simplifiée visant à commenter les lieux où les pics de pollution ont été mesurés.

Le Tableau 2 présente les valeurs moyennes de VCD_{tropo} observées sur et aux alentours des sites indiqués dans la première colonne du Tableau. On remarque qu'il y a 7 zones à pics élevés de pollution en NO_2 observés pendant nos mesures. Ces pics de pollution sont aussi visibles à partir de l'espace via les observations du satellite Tropomi SP5 illustrées à la Fig. 6 où les valeurs de satellite sont présentées en pixels rectangulaires. TROPOMI est un

spectromètre d'imagerie au nadir à bord du satellite Sentinel-5 Precursor. Il mesure le rayonnement solaire réfléchi dans l'ultraviolet, le visible et l'infrarouge (Veefkind *et al.* 2012). Avec une largeur de la fauchée de 2600 km, il peut couvrir l'ensemble de la planète en une seule journée avec une taille de pixel de 5,5 km x 3,5 km au nadir réel dans les bandes UV/VIS/proche-infrarouge. Nous avons utilisé des images retraitées (RPRO ; v0102). Les 7 zones présentent des caractéristiques semblables en lien direct avec le trafic routier intense. On observe aussi les conséquences des phénomènes de combustion de biomasse.

Tableau 2 : Caractéristiques des sites correspondant aux pics de pollution enregistrés

Localisation des sites	VCD_{tropo} molécules cm^{-2}	Caractéristique des sites
Rond point Ngaba	15×10^{15}	- Trafic routier intense de véhicules à forte émission - Arrêts de bus
Marché Matadi Kibala	13×10^{15}	- Trafic routier intense de véhicules à forte émission - Arrêts de bus
Carrefour UPN	14×10^{15}	- Trafic routier intense de véhicules à forte émission - Arrêts de bus
Kitambo Magasin	10×10^{15}	- Trafic routier intense - Arrêts de bus
Limete industrielle	10×10^{15}	- Trafic routier intense - zone industrielle
Marché Liberté	12×10^{15}	- Trafic routier intense de véhicules à forte émission - Arrêts de bus

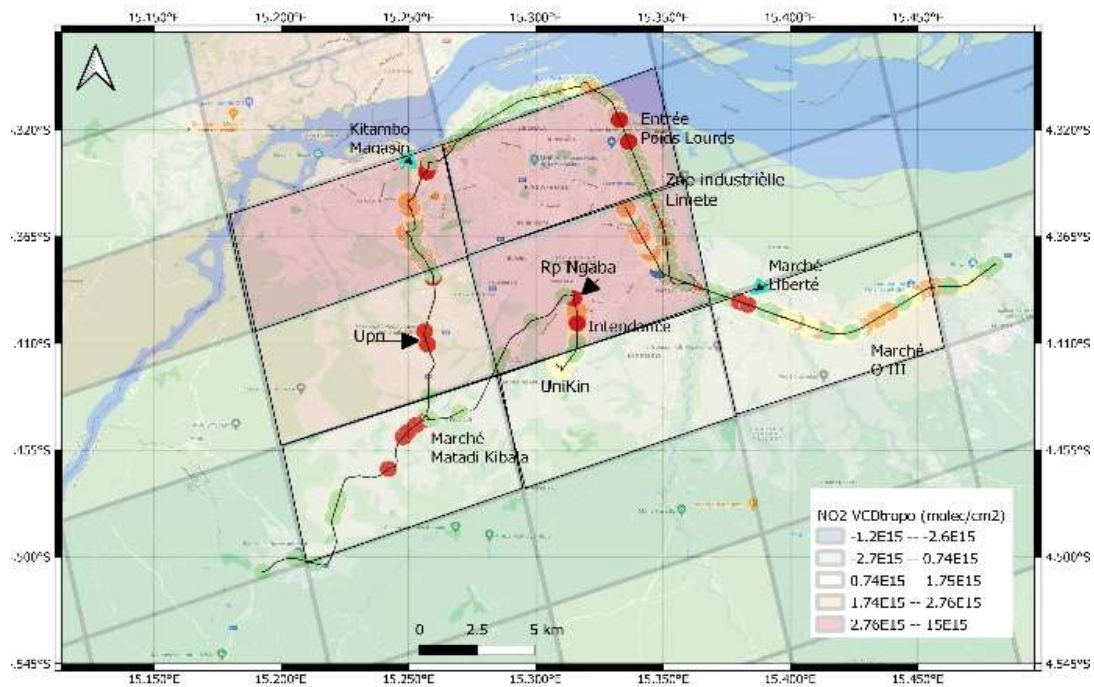


Figure 6 : Comparaison des mesures mobiles au sol de NO_2 (cette étude) avec les observations du satellite Tropomi SP5 pour la journée du 14 Novembre 2019.

La pollution atmosphérique par le NO₂ est présentée dans la littérature comme ayant pour sources les moteurs thermiques automobiles et les processus de combustion industrielle. D'autres sources d'origine naturelle sont également identifiées tels que, par exemple, la foudre. Dans notre cas, il s'avère clair que les pics observés proviennent du trafic routier intense, dominé essentiellement par des véhicules thermiques vétustes dégageant beaucoup de fumée illustrés par la Fig. 7.



Figure 7 : Exemple de véhicule à fortes émissions

Il faut signaler ici que les phénomènes observés dans ces zones sont répétitifs pendant toute l'année. Leur intensité peut augmenter de manière significative surtout aux heures de pointes (11h-13h et 16h-18h). Le phénomène étant répétitif chaque année dans ces sites, les observations faites ici perdurent tout au long de l'année et sont amenées à se poursuivre dans les années à venir. Les résultats présentés dans cette étude ne couvrent que 3 jours de mesures. Mais le trafic routier est intense tout au long de l'année sur les sites présentés au Tableau 2. Les émissions atmosphériques sont donc récurrentes. On observe cependant des augmentations ponctuelles même en dehors des heures de pointe. Il serait utile de faire des observations statiques pendant de longues périodes de temps sur ces sites pollués afin de compléter les observations présentées dans cette étude

Plusieurs grandes villes Africaines sont aussi frappées par la pollution de l'air. Les sources de pollution sont généralement de mêmes natures que celles que nous avons évoquées dans cette étude. Une étude menée dans deux grandes villes d'Uganda (Kampala et Jinja) a ainsi montré que les principales sources de pollution atmosphérique sont les émissions des véhicules, la poussière remise en suspension sur les routes non pavées, la fumée provenant de l'utilisation de la biomasse à l'intérieur des habitations et du brûlage des ordures, ainsi que les sites industriels. (J. Bruce *et al.*, 2015). Marais *et al.*, 2016 ont fait l'inventaire des sources d'émissions atmosphériques en Afrique et

montré la prédominance des combustions diffuses et inefficaces. L'accès à l'électricité est faible, les motos et les voitures vétustes prolifèrent. La situation de Kinshasa est très similaire.

4. CONCLUSIONS

Cet article présente un premier état des lieux relatif à la qualité de l'air dans la ville de Kinshasa. La pollution atmosphérique est négligée dans cette ville et ne fait l'objet d'aucune attention particulière de la part des scientifiques et des décideurs politiques. La présente étude vise à contribuer à sensibiliser la population locale et la communauté politique. Elle peut être utilisée comme point de départ avant d'approfondir le sujet.

Les espèces ciblées ici (le NO₂ et le CO₂) sont des polluants atmosphériques largement rencontrés. Un dispositif mobile équipé d'un capteur low cost a été utilisé pour des analyses d'air visant à évaluer la distribution spatiale de la pollution atmosphérique dans la ville de Kinshasa. Des observations de télédétection atmosphériques ont également été réalisées. Les mesures et l'analyse des spectres collectés sont basées sur la technique dite DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy).

Les résultats des mesures de dioxyde d'azote (NO₂) montrent que les zones à trafic routier intense sont fortement impactées. Les zones les plus polluées sont les carrefours de Rond-point Ngaba, de l'UPN, de Matadi Kibala et de Bitabe. Les régions industrielles des communes de la Gombe, et de Limete, ont particulièrement attiré notre attention dans le sens où les valeurs observées dépassaient fortement celles observées dans d'autres zones de la ville. Nous avons remarqué aussi que la teneur en NO₂ était moins importante dans les parties de la ville à trafic fluide, où les activités de commerce ne gênent pas la bonne circulation des véhicules, et où on ne retrouve pas d'activité industrielle. Le petit capteur Low cost utilisé pour mesurer la teneur en CO ne nous a pas permis de quantifier la pollution de manière fiable mais le signal enregistré lors des mesures révèle la présence de CO. Les valeurs de colonne troposphérique observées dans ces zones varient de 3 à 15× 10¹⁵ molécules cm⁻². Une comparaison simple avec les observations du satellite Tropomi SP5 démontre combien ces pics de pollution sont intenses et visibles à partir de l'espace aussi.

Nos observations montrent que la qualité de l'air est principalement impactée par un trafic routier intense dominé par la présence de véhicules vétustes à fortes émissions, les embouteillages qui en découlent, et la combustion incontrôlée de biomasse et de déchets

domestiques. Ces caractéristiques reflètent bien les sources des espèces étudiées dans notre travail.

La littérature scientifique montre que de très nombreuses villes d'Afrique et du monde connaissent des situations analogues. Ces sites présentent les mêmes caractéristiques d'activités en terme de trafic routier intense ou de combustion incontrôlée de biomasse ou de déchets ménagers.

Cette étude établit un état des lieux de la pollution de l'air dans la capitale congolaise. Une caractérisation plus fine de la pollution nécessiterait l'intégration de plusieurs stations, certaines fixes et d'autres mobiles pour la collecte en temps réel de données sur la qualité de l'air.

Pour tenter d'améliorer la qualité de l'air, nous formulons les recommandations suivantes :

- Aménager des gares routières, arrêts de bus et parkings afin de réduire les embouteillages dans la ville ;
- Réduire la circulation de véhicules vétustes dans la ville de Kinshasa ;
- imposer l'utilisation des dispositifs d'épuration de gaz d'échappement des véhicules sur l'ensemble de la ville ;
- instaurer un système de circulation alternée ;
- développer, densifier et améliorer les transports en commun et faire la promotion ;
- installer plusieurs stations de mesure des polluants atmosphériques à travers la ville ;
- sensibiliser la population aux phénomènes de la pollution de l'air ;
- mettre en place un système efficace de gestion des poubelles et immondices.

Néanmoins, les conditions actuelles rendent encore difficile la mise en place de ces recommandations. Il est nécessaire de mener des études plus approfondies dans le domaine de la pollution de l'air dans toutes villes de la RDC afin d'arriver à une base de données exploitable pouvant aider à la prise de décision.

5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADEME (2020). *Les déchets, chiffres-clés*, rapport annuel, Paris, 80p. ISSN : 2425-3588.

T. Ann, C.S. Poon, A. Wong, R. Yip & L. Jaillon (2013). Impact of construction waste disposal charging scheme on work practices at construction sites in Hong Kong. *Waste Management*, **33** (1), 138-146. [10.1016/j.wasman.2012.09.023](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.023)

C. Arnsperger & D. Bourg (2017). *Ecologie intégrale. Pour une société permacirculaire*, Paris, PUF.

V. Augiseau (2019). Utiliser les ressources secondaires de matériaux de construction : contraintes et pistes d'action pour des politiques territoriales. *Flux*, **116-117(2-3)**, 26-41. [10.3917/flux1.116.0026](https://doi.org/10.3917/flux1.116.0026)

V. Augiseau & S. Barles (2017). Studying construction materials flows and stock: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, **123**, 153-164. [10.1016/j.resconrec.2016.09.002](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.002)

Bellastock, Albert & Compagnie, Auxilia, Recovering, Le Phares, CSTB, Encore Heureux Architectes, Halage & BTP Consultants (2018). *Bilan technique et stratégique. An 1 de la phase opérationnelle du projet Métabolisme urbain. 2017-2018*, Rapport d'étude pour le compte de Plaine Commune, ADEME, Groupe CDC, Région Île-de-France.

CERC Île-de-France (2013). *Production des déchets de chantiers en Île-de-France et études connexes*, Rapport d'étude pour le compte du Conseil régional Île-de-France.

I.M. Chethana, S. Illankoon & W. Lu (2020). Cost implications of obtaining construction waste management-related credits in green building. *Waste Management*, **102**, 722-731. [10.1016/j.wasman.2019.11.024](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.024)

FFB (Fédération Française du Bâtiment) (2019). *Etude de scénarii pour la mise en place d'une organisation permettant une gestion efficace des déchets du bâtiment dans le cadre d'une économie circulaire*, Paris, rapport, 44p.

B.C. Guerra, F. Leite, K.M. Faust (2020). 4D-BIM to enhance construction waste reuse and recycle planning: Case studies on concrete and drywall waste streams. *Waste Management*, **116**, 79-90. [10.1016/j.wasman.2020.07.035](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.035)

M. F. Hasmori, A.F.M. Zin, S. Nagapan, R. Deraman, N. Abas, R. Yunus & M. Klufallah (2020). The on-site waste minimization practices for construction waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **713**. [10.1088/1757-899X/713/1/012038](https://doi.org/10.1088/1757-899X/713/1/012038)

M.U. Hossain, Z. Wu & C.S. Poon (2017). Comparative environmental evaluation of construction waste management through different waste sorting systems in Hong Kong. *Waste Management*, **69**, 325-335. [10.1016/j.wasman.2017.07.043](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.043)

B. Huang, X. Wang, H. Kua, Y. Geng, R. Bleischwitz & J. Ren (2018). Construction and demolition waste management in China through the 3R principle. *Resources, Conservation, Recycling*, **129**, 36-44. [10.1016/j.resconrec.2017.09.029](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.029)

- X. P. Kang, J.W. Wang & V.W.Y. Tam (2006). On-site sorting of construction waste in mainland China, a survey made in Shenzhen. *The CRIOCM2006 International Symposium on "Advancement of Construction Management and Real Estate"*.
- W. Lu & H. Yuan (2011). A framework for understanding waste management studies in construction. *Waste Management*, **31**, 1252-1260. [10.1016/j.wasman.2011.01.018](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.01.018)
- W. Lu & H. Yuan (2012). Off-site sorting of construction waste: What can we learn from Hong Kong? *Ressources, Conservation and Recycling*, **69**, 100-108. [10.1016/j.resconrec.2012.09.007](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.09.007)
- M. Ma, V.W.Y. Tam, K.N. Le & W. Li (2020). Challenges in current construction and demolition waste recycling: A China study. *Waste Management*, **118**, 610-625. [10.1016/j.wasman.2020.09.030](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.030)
- M. Marrero & A. Ramirez-De-Arellano (2010). The building cost system in Andalusia: Application to construction and demolition waste management. *Construction Management Economics*, **28** (5), 495-507. [10.1080/01446191003735500](https://doi.org/10.1080/01446191003735500)
- L.M.F. Maués, B.M. Oliveira do Nascimento, W. Lu & F. Xue (2020). Estimating construction waste generation in residential buildings: A fuzzy set theory approach in the Brazilian Amazon. *Journal of Cleaner Production*, **265**, 121779. [10.1016/j.jclepro.2020.121779](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121779)
- T. Moss (2014). Socio-technical Change and the Politics of Urban Infrastructure: Managing Energy in Berlin between Dictatorship and Democracy. *Urban Studies*, **51**(7), 1432-144. [10.1177/0042098013500086](https://doi.org/10.1177/0042098013500086)
- H.H. Ngoc, T. Ishigaki, R. Kubota, T.K. Tong, T.T. Nguyen, H.G. Nguyen, M. Yamada & K. Kawamoto (2020). Waste generation, composition, and handling in building-related construction and demolition in Hanoi, Vietnam. *Waste Management*, **117**, 32-41. [10.1016/j.wasman.2020.08.006](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.006)
- C.S. Poon, T.W. Ann TW & L.H.N. Yu (2001). On-site sorting of construction and demolition waste in Hong Kong. *Resources, Conservation and Recycling*, **32**, 157-172. [10.1016/S0921-3449\(01\)00052-0](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(01)00052-0)
- C.S. Poon, A.T.W. Yu, A. Wong & R. Yip (2013). Quantifying the impact of construction waste charging scheme on construction waste management in Hong Kong. *Journal of Construction, Engineering Management*, **139** (5), 466-479. [10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000631](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000631)
- R. Rameezdeen, N. Chileshe, M.R. Hosseini & S. Lehmann (2015). A qualitative examination of major barriers in implementation of reverse logistics within the South Australian construction sector. *International Journal of Construction Management*, **16**(3), 185-196. [10.1080/15623599.2015.1110275](https://doi.org/10.1080/15623599.2015.1110275)
- J.Y. Wang, H. Yuan, X.P. Kang & W. Lu (2010). Critical success factors for on-site sorting of construction waste: a China study. *Resources, Conservation and Recycling*, **54** (11), 931-936. [10.1016/j.resconrec.2010.01.012](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.01.012)
- I.D. Williams, T. Curran, E. den Boer, A. Pertl, D. Lock, A. Kent & P. Wilding (2014). Resource efficiency networks in the construction of new buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management*, **167**(4), 139-152. [10.1680/warm.13.00030](https://doi.org/10.1680/warm.13.00030)
- B. Yang, X. Song, H. Yuan & J. Zuo (2020). A model for investigating construction workers' waste reduction behaviors. *Journal of Cleaner Production*, **265**, 121841. [10.1016/j.jclepro.2020.121841](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121841)
- H. Yuan, L. Shen (2011). Trend of the research on construction and demolition waste management. *Waste Management*, **31**, 670-679. [10.1016/j.wasman.2010.10.030](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.10.030)
- H. Yuan, W. Lu & J.J.L. Hao (2013). The evolution of construction waste sorting on-site. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **20**, 483-490. [10.1016/j.rser.2012.12.012](https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.012)