

Dynamique saisonnière du dioxyde d'azote (NO_2) et du monoxyde de carbone (CO) dans le district d'Abidjan : analyse par télédétection et WebSIG

*Koffi Djaha Levix Nadir
N'Guessan Bi Vami Hermann
Konan Kouadio Justin*

Université Félix Houphouët Boigny (UFHB), Côte d'Ivoire
Centre Universitaire de Recherche et d'Application
en Télédétection (CURAT), Côte d'Ivoire

Doi: 10.19044/esipreprint.1.2026.p190

Approved: 06 January 2026
Posted: 08 January 2026

Copyright 2026 Author(s)
Under Creative Commons CC-BY 4.0
OPEN ACCESS

Cite As:

Koffi, D.L.N., N'Guessan, B.V.H. & Konan, K.J. (2026). *Dynamique saisonnière du dioxyde d'azote (NO_2) et du monoxyde de carbone (CO) dans le district d'Abidjan : analyse par télédétection et WebSIG*. ESI Preprints. <https://doi.org/10.19044/esipreprint.1.2026.p190>

Résumé

Abidjan, capitale économique de la Côte d'Ivoire, connaît une urbanisation rapide qui favorise l'augmentation des émissions atmosphériques, alors même que la ville ne dispose pas de réseaux de surveillance performants. Cette étude analyse la dynamique saisonnière du dioxyde d'azote (NO_2) et du monoxyde de carbone (CO) de 2019 à 2023 à partir des données satellitaires Sentinel-5P. Les concentrations ont été traitées par interpolation spatiale et intégrées dans un système d'information géographique en ligne, permettant une visualisation interactive et accessible au public comme aux décideurs. Les résultats montrent une variabilité saisonnière marquée. Le NO_2 présente un pic de $6,73 \times 10^{-5}$ en 2022, avec des concentrations plus élevées pendant la grande saison sèche, en lien avec la forte activité urbaine et une dispersion atmosphérique réduite. Le CO atteint un maximum de 0,0480 en 2020, soit une augmentation de 5,73 % par rapport à 2019, avec une intensité accrue également pendant la grande saison sèche. Ces tendances confirment le rôle des conditions météorologiques équatoriales, combinées aux activités industrielles et au trafic routier, dans l'accumulation des polluants. L'intégration des résultats dans un WebSIG

interactif constitue une innovation majeure, car elle facilite l'exploration des variations spatio-temporelles et sensibilise la population aux enjeux de qualité de l'air. Cette approche offre une alternative fiable et peu coûteuse aux réseaux classiques, tout en fournissant un outil précieux pour guider les politiques publiques et réduire les risques sanitaires liés à la pollution atmosphérique à Abidjan.

Mots clés : Pollution urbaine, télédétection, WebSIG, santé publique, NO₂, CO

Seasonal Dynamics Of Nitrogen Dioxide (NO₂) and Carbon Monoxide (CO) in the District of Abidjan: Analysis Using Remote Sensing and WebGIS

*Koffi Djaha Levix Nadir
N'Guessan Bi Vami Hermann
Konan Kouadio Justin*

Université Félix Houphouët Boigny (UFHB), Côte d'Ivoire
Centre Universitaire de Recherche et d'Application
en Télédétection (CURAT), Côte d'Ivoire

Abstract

Abidjan, the economic capital of Côte d'Ivoire, is undergoing rapid urbanization, which is contributing to an increase in atmospheric emissions, even though the city does not have effective monitoring networks. This study analyzes the seasonal dynamics of nitrogen dioxide (NO₂) and carbon monoxide (CO) from 2019 to 2023 using Sentinel-5P satellite data. The concentrations were processed using spatial interpolation and integrated into an online geographic information system, enabling interactive visualization accessible to both the public and decision-makers. The results show marked seasonal variability. NO₂ peaks at 6.73×10^{-5} in 2022, with higher concentrations during the dry season, linked to high urban activity and reduced atmospheric dispersion. CO reaches a maximum of 0.0480 in 2020, an increase of 5.73% compared to 2019, with increased intensity also during the dry season. These trends confirm the role of equatorial weather conditions, combined with industrial activities and road traffic, in the accumulation of pollutants. The integration of the results into an interactive WebGIS is a major innovation, as it facilitates the exploration of spatiotemporal variations and raises public awareness of air quality issues. This approach offers a reliable and inexpensive alternative to conventional

networks, while providing a valuable tool for guiding public policy and reducing the health risks associated with air pollution in Abidjan.

Keywords: Urban pollution, remote sensing, WebGIS, public health, NO₂, CO

Introduction

Le processus accéléré d'urbanisation et d'industrialisation a entraîné une augmentation mondiale des émissions de polluants atmosphériques, avec des conséquences néfastes pour la santé humaine, l'économie et l'environnement (Yang & Liu, 2018). Les pays en développement, notamment en Afrique et en Asie, sont disproportionnellement touchés par cette pollution (HEI, 2019). En Afrique subsaharienne, la pollution de l'air extérieur serait responsable de milliers de décès prématurés annuels (OMS, 2008), un fardeau sanitaire comparable à celui des maladies infectieuses majeures (Landrigan et al., 2018).

Face à cette urgence, la surveillance de la qualité de l'air est devenue un impératif. Cependant, dans de nombreux pays africains, cette surveillance est entravée par le coût élevé et la maintenance complexe des stations de mesure fixes (Ma et al., 2020).

La télédétection apparaît ainsi comme un outil complémentaire essentiel, permettant une couverture spatiale étendue et continue pour le suivi des polluants atmosphériques (N'Guessan BI et al., 2021). La télédétection offre une alternative prometteuse à ces contraintes. Des études menées dans diverses villes africaines ont déjà démontré le potentiel de l'imagerie satellitaire pour surveiller la dynamique du NO₂ et du CO, que ce soit à Accra, au Caire, ou encore à Enugu (Ejikeme et al., 2023; Sameh et al., 2023; Wang et al., 2022). Les observations satellitaires issues de Sentinel-5P/TROPOMI ont démontré une bonne performance pour l'estimation des concentrations de NO₂ et de CO, avec des corrélations élevées ($r \approx 0,75-0,85$) par rapport aux mesures in situ et un biais moyen inférieur à 10% (Ialongo et al., 2020; Verhoelst et al., 2021a). Plusieurs travaux confirment que ces données offrent une couverture spatiale fiable et continue, comblant ainsi les lacunes des réseaux de surveillance classiques, notamment en Afrique (Bahino et al., 2018).

Le District Autonome d'Abidjan, principal pôle économique de la Côte d'Ivoire, est un cadre d'étude pertinent. Si des travaux ont commencé à documenter la pollution particulaire (PM) via la télédétection (N'Guessan BI et al., 2021) ou utilisé des bioindicateurs (Tra Bi, 2020), les études sur les polluants gazeux (NO₂, SO₂, O₃, CO) et leur variabilité temporelle restent rares, comme souligné pour l'Afrique de l'Ouest (Bahino, 2018). Une analyse

fine de leur dynamique saisonnière, influencée par le régime des moussons, fait encore défaut.

Pour répondre à ce manque de connaissances, cette étude se propose d'analyser la dynamique saisonnière des principaux polluants gazeux à Abidjan sur la période 2019-2023. Notre approche combine l'exploitation de données satellitaires récentes (Sentinel-5P) et le développement d'un Système d'Information Géographique accessible via le web (WebSIG). L'objectif général est de mettre en place une plateforme WebSIG de visualisation et d'analyse des polluants atmosphériques à Abidjan afin de caractériser leurs variations saisonnières.

Les objectifs spécifiques sont :

Estimer et cartographier les concentrations de NO_2 , SO_2 , O_3 et CO sur des bases annuelles et saisonnières.

Analyser statistiquement l'évolution saisonnière de ces concentrations.

Concevoir et mettre en ligne une plateforme WebSIG interactive pour la diffusion et l'exploration des résultats.

Analyse et traitement des données

I.1. Présentation de la zone d'étude

Le District Autonome d'Abidjan (DAA), créé par le décret n°2011-263 du 28 septembre 2011, est situé sur le littoral sud de la Côte d'Ivoire, entre $5^{\circ}10'$ et $5^{\circ}40'$ de latitude Nord et $4^{\circ}30'$ et $4^{\circ}60'$ de longitude Ouest (Figure 1). Il couvre une superficie de 2 034 km² et englobe la ville d'Abidjan, capitale économique du pays, ainsi que quatre sous-préfectures (Anyama, Bingerville, Brofodoumé et Songon) et dix communes (Abobo, Adjamé, Attécoubé, Cocody, Koumassi, Marcory, Plateau, Port-Bouët, Treichville et Yopougon). Le climat d'Abidjan est de type équatorial humide, caractérisé par une alternance de quatre saisons principales (Traore, 2016) :

grande saison des pluies : avril – juillet,

petite saison sèche : juillet – septembre,

petite saison des pluies : septembre – novembre,

grande saison sèche : décembre – mars.

Les précipitations annuelles dépassent 1 500 mm, avec des maxima mensuels pouvant atteindre plus de 350 mm, tandis que les températures oscillent généralement entre 24 et 32 °C (Tra Bi, 2020). En saison humide, les vents du sud apportent de l'air saturé en humidité depuis le golfe de Guinée, favorisant la formation de systèmes orageux (lignes de grains) responsables de pluies intenses et du transport de particules fines depuis l'Afrique australe. En saison sèche, les vents du nord dominent, amenant des

poussières sahariennes (Harmattan) et des particules issues de la combustion de biomasse, contribuant à la dégradation de la qualité de l'air.

Depuis 1960, la Côte d'Ivoire a perdu une grande partie de son couvert forestier, passant de 16 millions d'hectares à environ 3,4 millions d'hectares aujourd'hui (Malan et al., 2023). Dans le DAA, la végétation originelle est fortement réduite par l'urbanisation et l'expansion des infrastructures. Des espaces protégés tels que la forêt du Banco subsiste, mais sont soumis à des pressions anthropiques croissantes (exploitation illicite du bois, extension urbaine, pollution). Cette dégradation de l'environnement limite le rôle de la végétation dans la régulation des polluants atmosphériques.

Avec une population estimée à 6,32 millions d'habitants en 2021, le District Autonome d'Abidjan concentre près de 20 % de la population nationale et plus de 40 % du PIB de la Côte d'Ivoire, ce qui en fait le principal pôle économique du pays. Il abrite plus de 60 % du tissu industriel national (Sako et al., 2013), ainsi que le Port Autonome d'Abidjan (PAA), infrastructure stratégique pour le commerce sous-régional.

Le DAA possède un réseau routier dense et une circulation automobile intense, dominée par l'usage de carburants Diesel à forte teneur en soufre (5 000 ppm), contrastant avec les normes internationales (< 50 ppm). Cette dépendance énergétique, combinée à la forte croissance démographique et à la concentration des industries, contribue largement aux émissions de NO_2 et CO , renforçant la problématique de pollution atmosphérique.

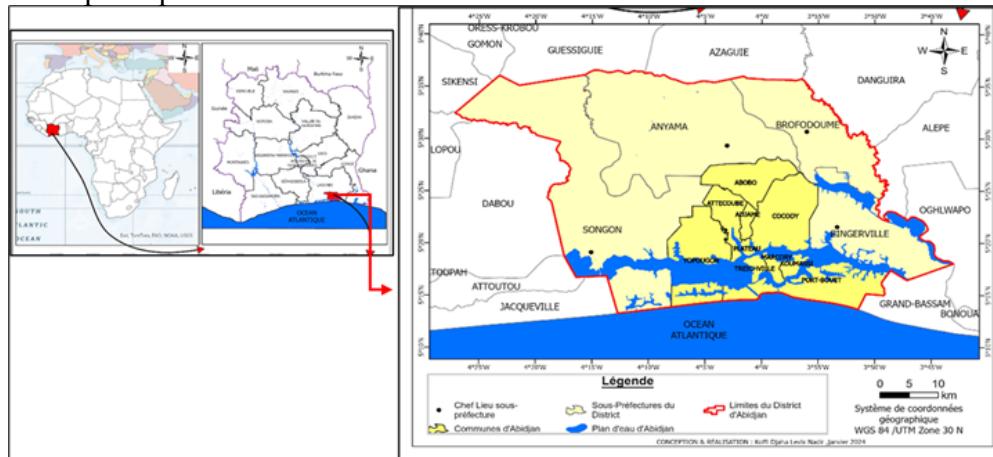


Figure 1 : Carte de localisation du District Autonome d'Abidjan (Côte d'Ivoire)

I.2. Données satellitaires

Cette étude s'appuie sur des données satellitaires issues du satellite Sentinel-5P, lancé le 13 octobre 2017 par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) dans le cadre du programme Copernicus. Équipé de l'instrument

TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument), Sentinel-5P est conçu pour la surveillance mondiale de la composition atmosphérique, offrant des mesures quotidiennes de polluants atmosphériques tels que le dioxyde d'azote (NO₂) et le monoxyde de carbone (CO) avec une résolution spatiale de 7 x 7 km² pour le NO₂ et de 7 x 5.5 km² pour le CO depuis 2018 (Veefkind et al., 2012). TROPOMI, un spectromètre à rétrodiffusion solaire, opère dans plusieurs bandes spectrales : ultraviolet-visible (270–500 nm) pour le NO₂ et infrarouge à ondes courtes (2 310–2 385 nm) pour le CO, ce qui permet une détection précise des colonnes troposphériques totales de ces polluants (Ialongo et al., 2020; Verhoelst et al., 2021). Ces caractéristiques offrent une amélioration significative par rapport aux instruments précédents comme OMI (Ozone Monitoring Instrument), avec une précision validée par des corrélations élevées ($r \approx 0,75$ –0,85) et un biais moyen inférieur à 10 % par rapport aux mesures in situ (Ialongo et al., 2020).

Les données utilisées dans cette étude, extraites de la plateforme Copernicus Data Space Ecosystem (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>), sont des produits de niveau 2 (L2) pour le NO₂ (colonnes troposphériques totales, exprimées en $\mu\text{mol}/\text{m}^2$) et le CO (colonnes totales, exprimées en mol/m²). Elles couvrent le District Autonome d'Abidjan (DAA) sur la période 2020–2024. Cette période a été choisie pour capturer les variations saisonnières liées au climat équatorial humide d'Abidjan, caractérisé par deux saisons sèches (décembre–mars et juillet–septembre) et deux saisons des pluies (avril–juillet et octobre–novembre), ainsi que pour refléter les tendances post-Covid, marquées par des fluctuations des activités anthropogéniques telles que le trafic routier et les activités industrielles (Bahino et al., 2018). Les données Sentinel-5P, accessibles librement, compensent l'absence de réseaux de surveillance au sol dans le DAA, permettant une analyse spatio-temporelle détaillée des concentrations de NO₂ et de CO dans un contexte urbain en rapide développement. Pour assurer la qualité des données, les produits L2 ont été filtrés en fonction des critères de qualité fournis par l'ESA, notamment en excluant les observations affectées par une couverture nuageuse élevée (fraction nuageuse $> 0,5$) ou des erreurs de mesure (indice de qualité $< 0,75$ pour le NO₂ et $< 0,5$ pour le CO). Les données ont été agrégées mensuellement pour analyser les variations saisonnières et spatiales des deux polluants, en tenant compte des influences climatiques (vents, précipitations) et des sources anthropogéniques (trafic, industries) décrites dans la section « Zone d'étude ». Ces données ont ensuite été intégrées dans un WebSIG interactif pour faciliter leur visualisation et leur analyse spatiale. Le tableau 1 résume les caractéristiques principales des données NO₂ et CO utilisées dans cette étude.

Tableau 1 : Récapitulatif des données satellitaires NO2 et CO utilisées

Polluant	Instrument	Produit	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Période	Unité	Source	Critères de qualité
NO2	TROPOMI/Sentinel-5P	Colonne troposphérique totale (L2)	7 x 7 km ²	Quotidienne	2020–2024	µmol/m ²	Copernicus Data Space	Fraction nuageuse < 0,5 ; Indice de qualité > 0,75
CO	TROPOMI/Sentinel-5P	Colonne totale (L2)	7 x 5,5 km ²	Quotidienne	2020–2024	mol/m ²	Copernicus Data Space	Fraction nuageuse < 0,5 ; Indice de qualité > 0,5

I.3. Méthodes

L’analyse de la dynamique saisonnière des concentrations de dioxyde d’azote (NO2) et de monoxyde de carbone (CO) dans le District Autonome d’Abidjan (DAA) repose sur une méthodologie intégrant la télédétection, le traitement cartographique, l’analyse statistique, et le développement d’un système d’information géographique en ligne (WebSIG) interactif, comme illustré dans l’organigramme méthodologique (Figure 2). Cette approche, structurée en quatre étapes principales (prétraitement des données, interpolation spatiale, analyse statistique, et visualisation via WebSIG), permet de cartographier et d’analyser les variations spatio-temporelles des deux polluants sur la période 2020–2024.

Prétraitement des données satellitaires

Les données utilisées proviennent de l’instrument TROPOMI à bord du satellite Sentinel-5P, détaillées dans la section I.2. Les produits de niveau 2 (L2) pour le NO2 (colonnes troposphériques totales, résolution spatiale de 7 x 7 km²) et le CO (colonnes totales, résolution de 7 x 5,5 km²) ont été extraits de la plateforme Copernicus Data Space Ecosystem (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>) (Ialongo et al., 2020; Verhoelst et al., 2021). Ces données ont été traitées à l’aide de Google Earth Engine (GEE), une plateforme cloud permettant un traitement efficace de grandes quantités de données géospatiales (Gorelick et al., 2017). Dans GEE, les données ont été filtrées selon trois critères :

Qualité des données : seules les observations avec une fraction nuageuse < 0,5 et un indice de qualité > 0,75 pour le NO2 et > 0,5 pour le CO ont été retenues, conformément aux recommandations de l’ESA.

Périodes saisonnières : les données ont été agrégées mensuellement et regroupées en quatre saisons climatiques propres à Abidjan, définies dans la section 1.1 : grande saison sèche (décembre–mars), petite saison sèche

(juillet–septembre), grande saison des pluies (avril–juillet), et petite saison des pluies (octobre–novembre) (Traore, 2016).

Zone géographique : les données ont été découpées pour couvrir le DAA ($5^{\circ}10'–5^{\circ}40'$ N, $4^{\circ}30'–4^{\circ}60'$ O). Les concentrations moyennes saisonnières et annuelles ont été calculées pour chaque pixel de la grille TROPOMI.

Interpolation spatiale

Pour obtenir des cartes à une résolution spatiale plus fine (100 x 100 m), adaptée à une analyse locale détaillée dans un contexte urbain hétérogène, une interpolation par Distance Inverse Pondérée (IDW) a été réalisée dans ArcGIS Pro. Cette méthode, proposée par Shepard (1968), estime les concentrations en attribuant un poids plus élevé aux points de données les plus proches, selon la formule :

$$Z(x) = \sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^p} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}$$

Où ($Z(x)$) est la concentration estimée à un point donné, Z_i est la concentration mesurée au point (i), d_i est la distance entre le point estimé et le point mesuré, et (p) est un paramètre de puissance (fixé à 2 dans cette étude pour équilibrer la précision et la fluidité des estimations). Cette approche permet de capturer les variations spatiales locales des concentrations de NO₂ et de CO, notamment dans les zones à forte activité anthropogénique comme le Port Autonome d'Abidjan ou les axes routiers majeurs (Bahino et al., 2018). Cependant, l'IDW peut lisser les variations abruptes, ce qui introduit des incertitudes, particulièrement dans les interfaces urbaines-rurales ou les zones industrielles du DAA. Ces limites, bien que non quantifiées dans cette étude, sont reconnues comme inhérentes à l'IDW dans des environnements urbains complexes (Mejía C. et al., 2023).

Analyse statistique

Les concentrations interpolées ont été analysées statistiquement à l'aide du logiciel Excel pour identifier les tendances saisonnières et annuelles. Pour chaque saison et chaque année (2020–2024), des statistiques descriptives (moyenne, médiane, écart-type, minimum, maximum) ont été calculées pour les concentrations de NO₂ et de CO. Des tests non paramétriques, tels que le test de Mann-Whitney, ont été appliqués pour comparer les concentrations entre saisons sèches et pluvieuses, en raison de la non-normalité des données (vérifiée par le test de Shapiro-Wilk). Ces

analyses ont permis d'identifier les périodes de pics de pollution, notamment en saison sèche, où les vents de l'harmattan et les activités anthropogéniques accentuent les concentrations (Levy et al., 2005) .

Développement du WebSIG

Un WebSIG interactif a été développé pour visualiser et analyser les variations spatio-temporelles des concentrations de NO₂ et de CO. Les cartes interpolées ont été converties en fichiers géospatiaux (GeoJSON) et optimisées pour le web à l'aide des bibliothèques Leaflet (JavaScript) et D3.js pour la visualisation dynamique. L'interface utilisateur, développée en HTML et CSS, comprend :

Une carte interactive centrée sur le DAA, permettant de superposer les couches de NO₂ et de CO.

Un panneau de contrôle pour sélectionner le polluant (NO₂ ou CO), la période (annuelle ou saisonnière), et l'année (2020–2024).

Une légende dynamique affichant les échelles de concentrations (en $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ pour NO₂ et mol/ m^2 pour CO).

Des fonctionnalités de requêtes spatiales, permettant aux utilisateurs d'extraire les concentrations pour des zones spécifiques (par exemple, communes ou sous-préfectures).

Le WebSIG a été hébergé sur un serveur local et optimisé pour une accessibilité publique, offrant un outil intuitif pour les décideurs, les chercheurs, et le public, afin de surveiller la qualité de l'air à Abidjan et de soutenir les politiques de gestion environnementale.

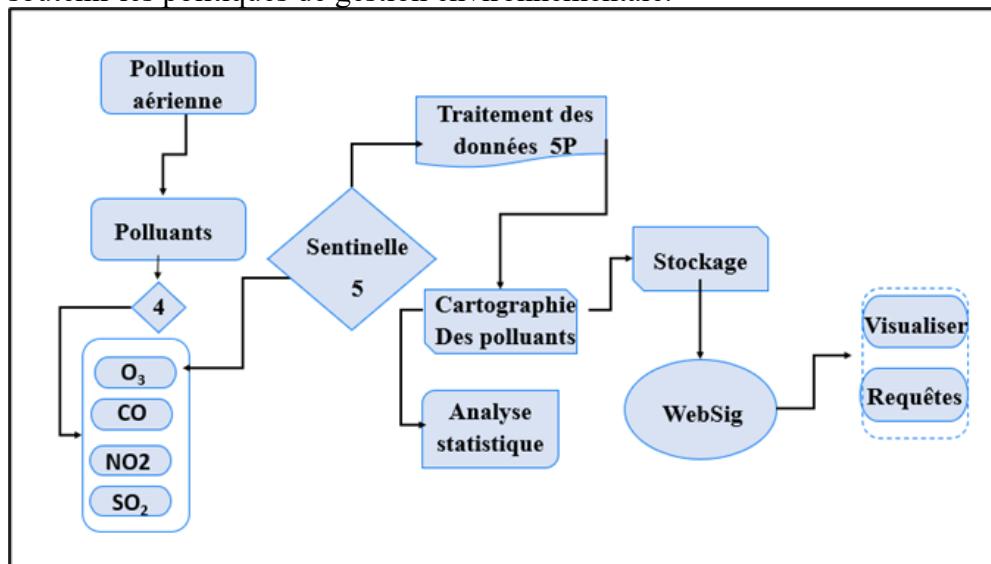


Figure 2: Organigramme méthodologique pour étudier la variation saisonnière et la répartition spatiale des polluants atmosphériques dans le district d'Abidjan

II. Résultats

II.1. Repartition spatiale du NO₂ et du CO dans le District d'Abidjan entre 2019 et 2023

Analyse annuelle

La Figure 3 illustre la distribution spatiale annuelle du dioxyde d'azote (NO₂) et du monoxyde de carbone (CO) sur le District Autonome d'Abidjan entre 2019 et 2023. L'analyse met en évidence une répartition relativement constante de ces polluants, avec une concentration particulièrement marquée dans le centre-ville d'Abidjan et ses environs immédiats.

Pour le NO₂, les cartes montrent des niveaux élevés et persistants au cœur d'Abidjan, notamment dans les communes fortement urbanisées (Plateau, Adjame, Treichville, Marcory, Cocody et Yopougon). Ces zones correspondent aux principaux axes routiers et aux zones industrielles, où la circulation automobile dense et les émissions liées aux activités industrielles constituent les principales sources de ce polluant. Le NO₂, reconnu comme un traceur de la pollution automobile, reflète ainsi la forte dépendance de la métropole aux transports routiers et l'utilisation de carburants à forte teneur en soufre, encore répandue dans le pays.

Concernant le CO, la tendance est similaire, avec des concentrations plus élevées et persistantes au centre-ville et dans les zones à forte densité d'activités économiques. Le CO est principalement émis par la combustion incomplète des carburants fossiles et du bois-énergie, une pratique encore courante dans certains quartiers périphériques. Les cartes révèlent que la pollution au CO suit un schéma spatial comparable à celui du NO₂, bien que légèrement plus étendu, englobant certaines banlieues où les activités domestiques et artisanales contribuent aux émissions.

Globalement, la période 2019–2023 montre une stabilité spatiale des zones à forte concentration de NO₂ et de CO, indiquant l'existence de véritables points chauds de pollution atmosphérique dans le District d'Abidjan. Ces foyers, situés majoritairement dans les zones centrales et industrialisées, témoignent du poids des transports et de l'industrialisation dans la dégradation de la qualité de l'air.

Ces résultats soulignent la nécessité d'actions ciblées de réduction des émissions, en particulier dans les secteurs du transport routier et de l'industrie, afin d'atténuer les risques sanitaires liés à l'exposition chronique au NO₂ et au CO dans la capitale économique ivoirienne.

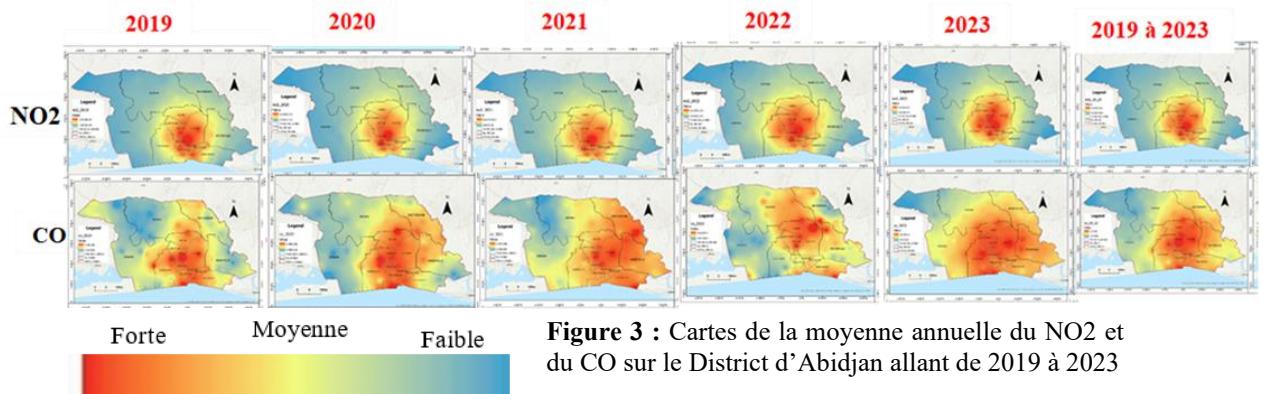


Figure 3 : Cartes de la moyenne annuelle du NO₂ et du CO sur le District d'Abidjan allant de 2019 à 2023

Analyse saisonnière

L'analyse saisonnière du monoxyde de carbone (CO) et du dioxyde d'azote (NO₂) entre 2019 et 2023, illustrée par les Figures 4 et 5, met en évidence des dynamiques spatio-temporelles contrastées entre ces deux polluants dans le District Autonome d'Abidjan.

Pour le CO, les cartes révèlent une forte variabilité saisonnière. Les concentrations les plus élevées sont observées durant les saisons pluvieuses (Grande Saison Pluvieuse – GSP et Petite Saison Pluvieuse – PSP), notamment dans le Nord-Est et le Sud-Ouest du district, avec une intensification marquée en 2019 et 2023. En revanche, les saisons sèches (Grande Saison Sèche – GSS et Petite Saison Sèche – PSS) présentent généralement des niveaux plus modérés et plus uniformes, bien qu'en 2022 une hausse relative ait été observée dans le Centre-Nord et le Sud-Est. Cette dynamique reflète l'influence des conditions météorologiques sur la dispersion des polluants : durant les saisons pluvieuses, l'humidité et la stabilité atmosphérique favorisent l'accumulation du CO, tandis que les saisons sèches, marquées par une meilleure dispersion, tendent à réduire les concentrations. Toutefois, les niveaux élevés et persistants dans certaines zones (Sud-Ouest, Nord-Est) suggèrent la présence de sources locales spécifiques (activités domestiques et artisanales, trafic routier, combustion de biomasse).

Pour le NO₂, la dynamique saisonnière apparaît moins marquée que pour le CO, mais la répartition spatiale reste préoccupante. Les cartes montrent des concentrations systématiquement élevées dans les zones centrales et orientales d'Abidjan (communes d'Abobo, Adjame, Attécoubé, Cocody, Koumassi, Marcory, Plateau, Port-Bouët, Treichville et Yopougon). Cette constance suggère que les émissions de NO₂ sont principalement liées à des sources persistantes telles que le trafic routier intense et les activités industrielles. Si une légère baisse a été enregistrée en 2021, probablement liée à une diminution temporaire des activités économiques post-Covid, les

concentrations repartent à la hausse dès 2022 et 2023, avec une intensification notable dans le Sud-Est durant la PSS. Contrairement au CO, les variations saisonnières du NO₂ sont donc moins influencées par les conditions climatiques et davantage par la constance des sources anthropiques.

En somme, cette analyse saisonnière révèle que le CO présente une forte variabilité spatio-temporelle liée aux conditions météorologiques, tandis que le NO₂ reste concentré et stable dans les zones fortement urbanisées, en raison d'émissions anthropiques persistantes. Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'interventions différenciées : réduction des émissions de CO dans les zones sensibles aux variations saisonnières, et contrôle renforcé des émissions de NO₂ dans les communes centrales où la pollution persiste indépendamment des saisons.

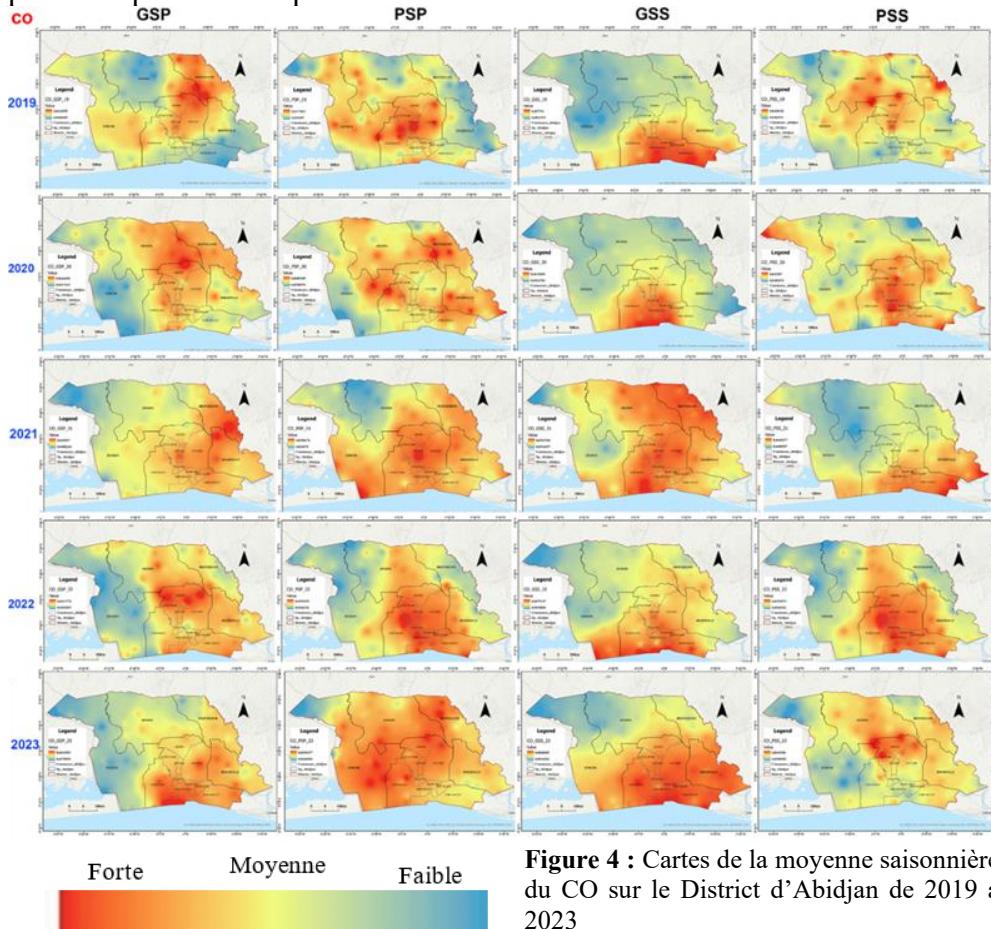


Figure 4 : Cartes de la moyenne saisonnière du CO sur le District d'Abidjan de 2019 à 2023

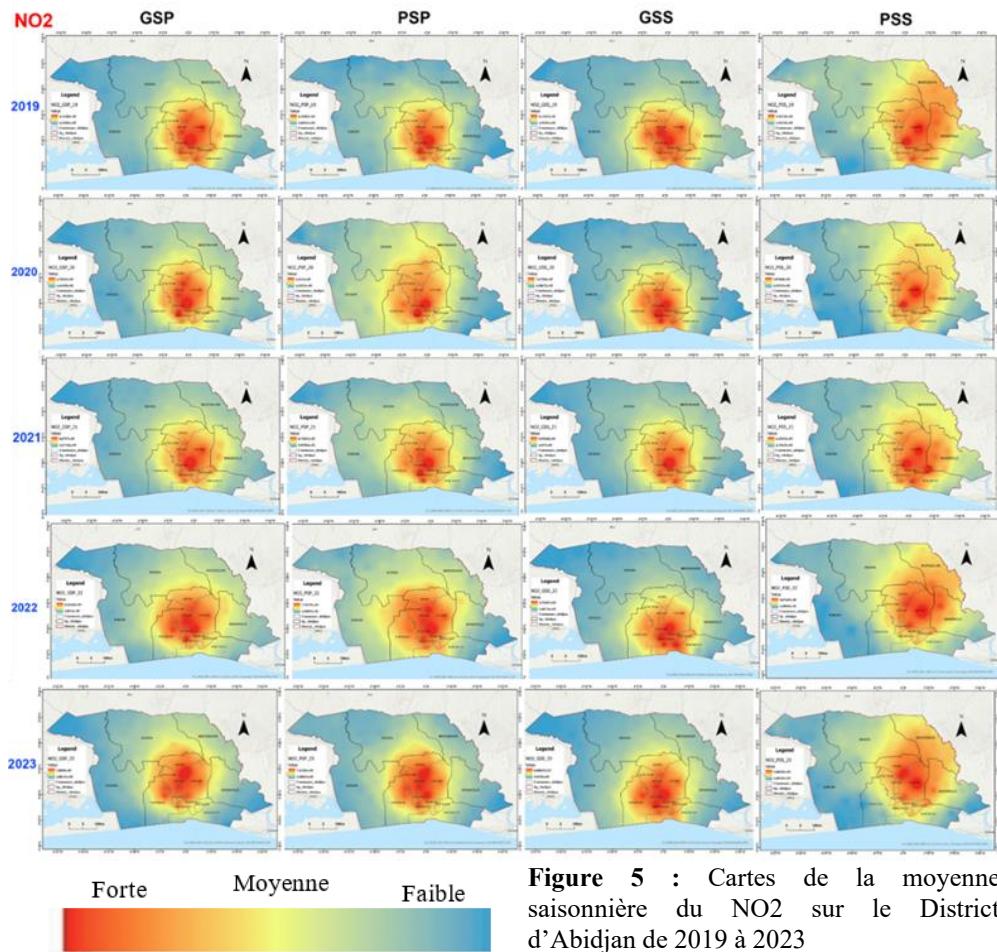


Figure 5 : Cartes de la moyenne saisonnière du NO₂ sur le District d'Abidjan de 2019 à 2023

II.2. Analyse statistiques de l'évolution des concentrations des principaux polluants atmosphériques

Statistiques annuelles

La figure 6 présente les valeurs statistiques de la moyenne annuelle des concentrations de monoxyde de carbone (CO) et de dioxyde d'azote (NO₂) dans le district d'Abidjan de 2019 à 2023, exprimées en microgrammes par mètre cube ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Les résultats montrent que le CO enregistre des concentrations relativement stables sur la période étudiée, comprises entre 0,0431 et 0,0492 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Une hausse notable est observée en 2020, où la moyenne annuelle atteint 0,0480 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, soit la valeur la plus élevée des cinq années. Après ce pic, une baisse progressive est constatée jusqu'en 2023, où la moyenne redescend à 0,0453 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, proche des niveaux de 2019. Sur la Figure 6 cette tendance, caractérisée par une dynamique ascendante en 2020 suivie d'un déclin modéré. Ce comportement suggère un contexte particulier en 2020

(accroissement d'activités anthropiques, effets secondaires liés aux mesures de mobilité pendant la pandémie, etc.), suivi de mesures correctives et d'une meilleure maîtrise des émissions dans les années ultérieures.

Concernant le NO₂, les concentrations sont plus faibles en valeur absolue mais présentent une évolution distincte. Les moyennes annuelles varient entre 4,389E-05 et 6,014E-05 µg/m³. On observe une tendance à la hausse de 2019 à 2021, culminant en 2021 avec une moyenne de 5,782E-05 µg/m³. Cette période correspond à une probable intensification des activités industrielles et du trafic automobile, principales sources de NO₂. À partir de 2022, les concentrations se stabilisent, oscillant autour de 6,0E-05 µg/m³, sans augmentation marquée jusqu'en 2023. Une phase ascendante jusqu'en 2021 suivie d'une stagnation, traduisant possiblement l'effet de régulations environnementales ou d'un plafonnement des émissions liées aux sources locales. En résumé, l'analyse statistique met en évidence :

un pic du CO en 2020, suivi d'une baisse régulière ;
une hausse progressive du NO₂ jusqu'en 2021, suivie d'une phase de stabilisation.

Ces résultats traduisent deux dynamiques différentes : le CO, plus sensible aux variations conjoncturelles, et le NO₂, plus associé à des émissions structurelles liées au trafic et aux zones industrielles denses.

Dans une perspective comparative, l'évolution du CO et du NO₂ entre 2019 et 2023 met en évidence deux dynamiques contrastées. Le CO présente une variabilité marquée, avec un pic soudain en 2020 suivi d'une diminution progressive, traduisant une sensibilité plus forte aux fluctuations conjoncturelles et aux changements ponctuels d'activités anthropiques. À l'inverse, le NO₂ révèle une tendance structurelle ascendante entre 2019 et 2021, avant de se stabiliser, suggérant la persistance de sources d'émissions régulières et difficiles à contenir, en particulier le trafic routier et les zones industrielles. Ainsi, si le CO apparaît comme un indicateur des variations temporaires de pollution liées aux contextes socio-économiques spécifiques, le NO₂ reflète davantage la charge chronique de pollution atmosphérique dans le district d'Abidjan. Ces résultats soulignent la nécessité d'adopter des stratégies différencierées : des mesures de contrôle rapides et ponctuelles pour réduire les pics de CO, et des politiques structurelles de long terme pour limiter les émissions persistantes de NO₂.

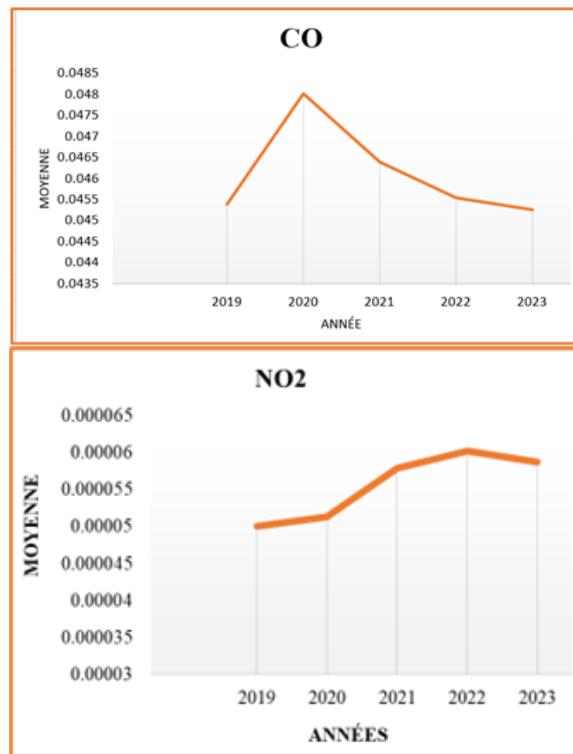


Figure 6: Évolution des émissions annuelles moyennes du NO₂ et CO dans le district d'Abidjan (2019-2023)

Statistiques saisonnières (CO et NO₂)

Le Tableau 2 présente les moyennes saisonnières des concentrations de dioxyde d'azote (NO₂) et de monoxyde de carbone (CO) dans le District Autonome d'Abidjan sur la période 2019–2023. Ces données permettent d'analyser la variabilité saisonnière des polluants atmosphériques majeurs et d'évaluer leur niveau au regard des normes internationales de qualité de l'air établies par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).

Concernant le dioxyde d'azote (NO₂), les résultats montrent une variabilité saisonnière nette, avec des concentrations systématiquement plus élevées durant les saisons sèches, en particulier la grande saison sèche, où les valeurs atteignent un maximum de $6,73 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2022. À l'inverse, les saisons pluvieuses enregistrent les niveaux les plus faibles, traduisant l'effet du lessivage atmosphérique par les précipitations. Comparativement aux lignes directrices de l'OMS, qui fixent une valeur guide annuelle de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le NO₂, les concentrations observées à Abidjan demeurent largement inférieures aux seuils sanitaires, indiquant une absence de risque immédiat pour la santé humaine. Toutefois, la tendance à l'augmentation progressive entre 2019 et 2022 suggère une pression croissante liée au trafic

routier, à l'urbanisation et aux activités industrielles, ce qui justifie une vigilance accrue et un suivi continu.

Pour le monoxyde de carbone (CO), l'analyse révèle également une saisonnalité marquée, caractérisée par des concentrations plus élevées en grande saison sèche, avec un pic de $0,0585 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2020, et des valeurs plus faibles durant les saisons pluvieuses. Cette dynamique est cohérente avec la dominance des sources de combustion (trafic automobile, groupes électrogènes, activités domestiques) et une moindre dispersion atmosphérique en saison sèche. En comparaison avec la norme OMS, qui recommande une concentration maximale de $4 \text{ mg}/\text{m}^3$ (soit $4\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sur 24 heures, les niveaux mesurés restent extrêmement faibles et très en dessous des seuils critiques. Néanmoins, la relative stabilité interannuelle du CO indique une persistance des sources d'émission, soulignant l'importance de politiques de transport durable et de réduction des combustions incomplètes afin de prévenir toute dégradation future de la qualité de l'air.

Tableau 2 : Moyennes saisonnières des concentrations de dioxyde d'azote (NO_2) et de monoxyde de carbone (CO) dans le District Autonome d'Abidjan (2019–2023)

Année	Saison	Dioxyde d'azote (NO_2) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Monoxyde de carbone (CO) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
2019	Grande saison pluvieuse	$4,89 \times 10^{-5}$	0,0415403
	Petite saison pluvieuse	$4,52 \times 10^{-5}$	0,0369756
	Grande saison sèche	$5,95 \times 10^{-5}$	0,0557309
	Petite saison sèche	$4,36 \times 10^{-5}$	0,0416646
2020	Grande saison pluvieuse	$5,08 \times 10^{-5}$	0,04328494
	Petite saison pluvieuse	$5,01 \times 10^{-5}$	0,03980554
	Grande saison sèche	$5,32 \times 10^{-5}$	0,0585206
	Petite saison sèche	$4,82 \times 10^{-5}$	0,04158175
2021	Grande saison pluvieuse	$5,46 \times 10^{-5}$	0,04148918
	Petite saison pluvieuse	$6,25 \times 10^{-5}$	0,03840881
	Grande saison sèche	$5,80 \times 10^{-5}$	0,05574351
	Petite saison sèche	$5,38 \times 10^{-5}$	0,04185186
2022	Grande saison pluvieuse	$6,06 \times 10^{-5}$	0,0402828
	Petite saison pluvieuse	$5,75 \times 10^{-5}$	0,03796473
	Grande saison sèche	$6,73 \times 10^{-5}$	0,05559
	Petite saison sèche	$4,95 \times 10^{-5}$	0,03796473
2023	Grande saison pluvieuse	$5,81 \times 10^{-5}$	0,0395666
	Petite saison pluvieuse	$5,42 \times 10^{-5}$	0,0383739
	Grande saison sèche	$6,54 \times 10^{-5}$	0,05430458
	Petite saison sèche	$5,09 \times 10^{-5}$	0,04203889

II.3. Plateforme WebSIG

Une plateforme WebSIG interactive a été conçue afin de faciliter la visualisation et l'analyse des concentrations atmosphériques de NO_2 et de CO dans le District Autonome d'Abidjan sur la période 2019-2023. L'application est accessible à l'adresse suivante :

https://nadir02.github.io/poluant_No2/. L’interface propose un menu de navigation permettant de sélectionner le polluant (NO_2 ou CO), l’année et la saison d’intérêt. Une fois ces filtres appliqués, l’utilisateur peut afficher la carte dynamique correspondante.

Les concentrations sont représentées par un dégradé de couleurs allant du bleu (faible concentration) au rouge (forte concentration), ce qui permet une lecture intuitive des zones de pollution. Par exemple, les niveaux élevés de NO_2 sont systématiquement observés dans les communes centrales d’Abidjan (Plateau, Adjame, Yopougon, Cocody, Marcory, Treichville, etc.), confirmant le rôle du trafic routier et des zones industrielles comme principales sources d’émissions. Quant au CO , ses concentrations varient davantage selon les saisons, avec des pics notables pendant les périodes sèches (notamment dans le Nord-Est et le Sud-Ouest du district), traduisant une influence combinée des activités anthropiques et des conditions météorologiques de dispersion.

Outre la cartographie interactive, la plateforme intègre des graphiques statistiques dynamiques (graphiques à barres et séries temporelles), permettant de comparer les moyennes saisonnières et annuelles des deux polluants. À titre d’exemple, les moyennes annuelles de NO_2 varient de $4,999 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2019 à $6,014 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2022, avant une légère baisse en 2023 ($5,870 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Tableau 1, Figure 4). De son côté, le CO atteint son maximum en 2020 ($0,048 \mu\text{g}/\text{m}^3$), suivi d’une diminution progressive jusqu’en 2023, ce qui reflète à la fois l’évolution des activités humaines et l’effet des mesures de gestion urbaine.

Cette application WebSIG constitue un support innovant pour la diffusion et l’analyse des données atmosphériques à Abidjan. Elle permet d’identifier les zones les plus touchées par la pollution (points chauds urbains) et d’apprécier les variations saisonnières et interannuelles du NO_2 et du CO . Par sa simplicité d’utilisation et la richesse de ses fonctionnalités, elle représente un instrument précieux pour la sensibilisation, l’aide à la décision et la planification de politiques de réduction des émissions dans un contexte de forte urbanisation.

II.4. Discussion

L’analyse de la dynamique saisonnière du dioxyde d’azote (NO_2) et du monoxyde de carbone (CO) dans le district d’Abidjan met en évidence des tendances caractéristiques des environnements urbains tropicaux, tout en révélant certaines spécificités propres au contexte local. Les résultats montrent que les concentrations maximales de NO_2 ($6,73 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2022) et de CO ($0,0561 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sont observées durant les saisons sèches, traduisant l’influence combinée des conditions météorologiques et des activités anthropiques. En effet, la grande et la petite saison sèche se

caractérisent par une dispersion atmosphérique limitée, favorisant l'accumulation des polluants. Ces résultats sont cohérents avec des études menées dans des mégapoles telles que Pékin et Shanghai(Chen et al., 2019; Zhang et al., 2025), où des pics saisonniers similaires ont été observés, bien que les niveaux absous y soient nettement plus élevés en raison de l'intensité du trafic et des émissions industrielles.

L'utilisation des données satellitaires Sentinel-5P (résolution $7 \times 3,5$ km) a permis de cartographier avec précision la distribution spatiale du NO₂ et du CO à Abidjan, offrant une amélioration notable par rapport aux produits satellitaires plus anciens tels que MODIS ou GOME-2. Les corrélations positives observées avec les mesures in situ ($r \approx 0,75-0,85$) confirment la fiabilité de ces données pour l'analyse des variations saisonnières, en particulier pour le NO₂ (Ialongo et al., 2020; Verhoelst et al., 2021). L'intégration des résultats dans un WebSIG interactif constitue un apport méthodologique majeur, facilitant l'identification des zones d'accumulation, notamment dans les communes centrales fortement urbanisées.

Sur le plan comparatif, bien que les concentrations maximales de NO₂ et de CO à Abidjan demeurent inférieures aux seuils recommandés par l'OMS et à celles observées dans des villes comme Pékin, Shanghai ou Mexico, les tendances saisonnières sont similaires, confirmant l'influence déterminante du climat sur la dispersion des polluants urbains. Toutefois, la combinaison d'un climat équatorial humide et d'une urbanisation rapide favorise une exposition prolongée des populations durant les périodes sèches, ce qui soulève des préoccupations sanitaires, notamment en lien avec les pathologies respiratoires et cardiovasculaires.

En définitive, cette étude souligne l'importance d'une surveillance conjointe du NO₂ et du CO, deux polluants étroitement associés aux transports et aux activités urbaines. La mise en œuvre de stratégies de réduction ciblées, en particulier dans les secteurs du transport routier et de l'industrie, apparaît essentielle pour limiter les risques sanitaires et améliorer durablement la qualité de l'air dans le district d'Abidjan.

Conclusion

En conclusion, cette étude sur la dynamique saisonnière des polluants atmosphériques dans le district d'Abidjan met en évidence l'apport essentiel des données satellitaires Sentinel-5P pour la surveillance de la qualité de l'air dans un contexte urbain tropical caractérisé par l'insuffisance des réseaux de mesure au sol. La méthodologie adoptée, combinant le traitement des données sur Google Earth Engine, la cartographie sous ArcGIS Pro et l'intégration dans un WebSIG interactif, s'est révélée efficace pour analyser

et représenter la variabilité spatio-temporelle des principaux polluants atmosphériques.

Les résultats montrent des variations saisonnières marquées, avec des concentrations plus élevées de monoxyde de carbone et de dioxyde d'azote durant les saisons sèches, confirmant l'influence conjointe des conditions météorologiques et des activités anthropiques, notamment le transport routier et les activités industrielles. Bien que les niveaux observés demeurent globalement inférieurs aux valeurs guides de l'Organisation Mondiale de la Santé, leur persistance saisonnière souligne un risque potentiel lié à l'exposition chronique des populations urbaines.

Au-delà de sa contribution scientifique, cette recherche souligne la nécessité de renforcer les systèmes de surveillance de la qualité de l'air et de mettre en œuvre des stratégies de réduction ciblées afin de limiter les impacts sanitaires et environnementaux. L'utilisation conjointe des données satellitaires et des outils interactifs de visualisation constitue une approche prometteuse pour appuyer les décideurs dans l'élaboration de politiques de gestion durable de la pollution atmosphérique à Abidjan et, plus largement, dans les grandes villes africaines en forte croissance.

Conflit d'intérêts : Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données : Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

Déclaration de financement : Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

References:

1. Bahino, J. (2018). Analyse de la qualité de l'air dans les zones urbaines en Afrique: Caractérisation de la pollution gazeuse des espèces chimiques NO₂, SO₂, HNO₃, NH₃ et O₃ à Abidjan et Cotonou [These de Doctorat]. Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody.
2. Bahino, J., Véronique, Y., Corinne, G.-L., Adon, M., Aristide, A., Keita, S., Liousse, C., Gardrat, E., Chiron, C., Ossohou, M., Gnamien, S., & Djossou, J. (2018). A pilot study of gaseous pollutants' measurement (NO₂, SO₂, NH₃, HNO₃ and O₃) in Abidjan, Côte d'Ivoire: Contribution to an overview of gaseous pollution in African cities. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 5173-5198. <https://doi.org/10.5194/acp-18-5173-2018>
3. Chen, H. H., Qi, Y., Wang, Y., & Chai, F. (2019). Seasonal variability of SST fronts and winds on the southeastern continental

- shelf of Brazil. *Ocean Dynamics*, 69(11-12), 1387-1399. <https://doi.org/10.1007/s10236-019-01310-1>
4. Ejikeme, J., Adogu, K., & Onwuzuligbo, C. (2023). Monitoring of Spatio-Temporal Dynamics of Air Pollution in Enugu Urban using Remote Sensing and GIS. *European Journal of Environment and Earth Sciences*, 4(2), 22-31. <https://doi.org/10.24018/ejgeo.2023.4.2.387>
5. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
6. HEI, H. E. (2019, janvier 29). Annual Report 2018. Health Effects Institute. <https://www.healtheffects.org/publication/annual-report-2018>
7. Ialongo, I., Virta, H., Eskes, H., Hovila, J., & Douros, J. (2020). Comparison of TROPOMI/Sentinel-5 Precursor NO₂ observations with ground-based measurements in Helsinki. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(1), 205-218. <https://doi.org/10.5194/amt-13-205-2020>
8. Landrigan, P. J., Fuller, R., Acosta, N. J. R., Adeyi, O., Arnold, R., Basu, N. (Nil), Baldé, A. B., Bertollini, R., Bose-O'Reilly, S., Boufford, J. I., Breysse, P. N., Chiles, T., Mahidol, C., Coll-Seck, A. M., Cropper, M. L., Fobil, J., Fuster, V., Greenstone, M., Haines, A., ... Zhong, M. (2018). The Lancet Commission on pollution and health. *The Lancet*, 391(10119), 462-512. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)32345-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32345-0)
9. Levy, R. C., Remer, L. A., Martins, J. V., Kaufman, Y. J., Planat-Fattori, A., Redemann, J., & Wenny, B. (2005). Evaluation of the MODIS Aerosol Retrievals over Ocean and Land during CLAMS. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(4), 974-992. <https://doi.org/10.1175/JAS3391.1>
10. Ma, J., Ding, Y., Cheng, J. C. P., Jiang, F., Tan, Y., Gan, V. J. L., & Wan, Z. (2020). Identification of high impact factors of air quality on a national scale using big data and machine learning techniques. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118955. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118955>
11. Malan, D. F., Kougbo, M. D., Dogba, M., & Konan, A. S. (2023). Dynamique Spatio-Temporelle et Intérêt pour la Conservation de la Forêt Classée de Goin-Débé, une Aire Protégée Menacée de Disparition à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. *European Scientific Journal, ESJ*, 20, 547-547.

12. Mejía C., D., Alvarez, H., Zalakeviciute, R., Macancela, D., Sanchez, C., & Bonilla, S. (2023). Sentinel satellite data monitoring of air pollutants with interpolation methods in Guayaquil, Ecuador. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 31, 100990. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.100990>
13. N'Guessan BI, V. H., Stephanie, L., André, L., & Affian, K. (2021). Estimation Des Concentrations Et Cartographie De La Dynamique Des Polluants Atmosperiques Particulaires Dans La Ville D'abidjan. *European Scientific Journal*, ESJ, 17, 116. <https://doi.org/10.19044/esj.2021.v17n43p116>
14. OMS. (2008). Rapport sur la santé dans le monde 2008 : Les soins de santé primaires—Maintenant plus que jamais. <https://iris.who.int/items/367c3918-3146-4fac-b0f1-641cbbd7ee0d>
15. Sako, N., Beltrando, G., Atta, K. L., N'da, H. D., & Brou, T. (2013). Dynamique forestière et pression urbaine dans le Parc national du Banco (Abidjan, Côte d'Ivoire). *VertigO*, 13-2. <https://doi.org/10.4000/vertigo.14127>
16. Sameh, S., Zarzoura, F., & El-Mewafi, M. (2023). Spatio-temporal Analysis Mapping of Air Quality Monitoring in Cairo using Sentinel-5 satellite data and Google earth engine. *Mansoura Engineering Journal*, 49(1). <https://doi.org/10.58491/2735-4202.3122>
17. Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference On* -, 517-524. <https://doi.org/10.1145/800186.810616>
18. Tra Bi, F., & Zamblé. (2020). Evaluation de la qualité de l'air dans le district autonome d'Abidjan (Côte d'Ivoire) à partir des caractéristiques spectrales et biochimiques des feuilles de plantes ornementales. [Thesis, Université Jean Lorougnon Guédé]. <https://dicames.online/jspui/handle/20.500.12177/5894>
19. Traore, K. M. (2016). Analyse des vulnérabilités de la ville côtière de San-Pedro (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) [These de Doctorat, Université Felix Houphouet-Boigny de Cocody-Abidjan]. <https://sde.hal.science/tel-01539494>
20. Veefkind, J. P., Aben, I., McMullan, K., Förster, H., de Vries, J., Otter, G., Claas, J., Eskes, H. J., de Haan, J. F., Kleipool, Q., van Weele, M., Hasekamp, O., Hoogeveen, R., Landgraf, J., Snel, R., Tol, P., Ingmann, P., Voors, R., Kruizinga, B., ... Levelt, P. F. (2012). TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sensing of Environment*, 120, 70-83. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027>

21. Verhoelst, T., Compernolle, S., Pinardi, G., Lambert, J.-C., Eskes, H. J., Eichmann, K.-U., Fjæraa, A. M., Granville, J., Niemeijer, S., Cede, A., Tiefengraber, M., Hendrick, F., Pazmiño, A., Bais, A., Bazzureau, A., Boersma, K. F., Bognar, K., Dehn, A., Donner, S., ... Zehner, C. (2021a). Ground-based validation of the Copernicus Sentinel-5P TROPOMI NO₂ measurements with the NDACC ZSL-DOAS, MAX-DOAS and Pandonia global networks. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(1), 481-510. <https://doi.org/10.5194/amt-14-481-2021>
22. Verhoelst, T., Compernolle, S., Pinardi, G., Lambert, J.-C., Eskes, H. J., Eichmann, K.-U., Fjæraa, A. M., Granville, J., Niemeijer, S., Cede, A., Tiefengraber, M., Hendrick, F., Pazmiño, A., Bais, A., Bazzureau, A., Boersma, K. F., Bognar, K., Dehn, A., Donner, S., ... Zehner, C. (2021b). Ground-based validation of the Copernicus Sentinel-5P TROPOMI NO₂ measurements with the NDACC ZSL-DOAS, MAX-DOAS and Pandonia global networks. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(1), 481-510. <https://doi.org/10.5194/amt-14-481-2021>
23. Wang, J., Alli, A. S., Clark, S., Hughes, A., Ezzati, M., Beddows, A., Vallarino, J., Nimo, J., Bedford-Moses, J., Baah, S., Owusu, G., Agyemang, E., Kelly, F., Barratt, B., Beevers, S., Agyei-Mensah, S., Baumgartner, J., Brauer, M., & Arku, R. E. (2022). Nitrogen oxides (NO and NO₂) pollution in the Accra metropolis: Spatiotemporal patterns and the role of meteorology. *Science of The Total Environment*, 803, 149931. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149931>
24. Yang, T., & Liu, W. (2018). Does air pollution affect public health and health inequality? Empirical evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, 203, 43-52. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.242>
25. Zhang, Y., Yu, H., Smedt, I., Lin, J., Theys, N., Van Roozendael, M., Pinardi, G., Compernolle, S., Ni, R., Ren, F., Wang, S., Chen, L., van Geffen, J., Liu, M., Cede, A., Tiefengraber, M., Merlaud, A., Friedrich, M., Richter, A., & Fabris, L. (2025). Global retrieval of TROPOMI tropospheric HCHO and NO₂ columns with improved consistency based on the updated Peking University OMI NO₂ algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, 18, 1561-1589. <https://doi.org/10.5194/amt-18-1561-2025>