

Analyse de la tendance des émissions anthropiques de méthane (CH₄) en Afrique de l'Ouest entre 1970 et 2023 : une approche par cluster

Marie Laurene Gonsan¹, Dro Touré Tiémoko^{1,2,*}, René Anoumou Tano¹, Jacques Aka Adon¹, Justin Koffi Kouamé³, Adama Bakayoko⁴, Fidèle Yoroba^{2,4}, Bafétigué Ouattara¹, Yao Tchétché¹, F.-X. Djézia Bella Bouo¹

¹Equipe de la Physique pour l'Environnement, Laboratoire de Physique Fondamentale et Appliquée, Université Nangui ABROGOUA, 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire

²Station géophysique de Lamto (GSL), N'Douci BP 31, Côte d'Ivoire

³Département de Physique, Université de Man, BP 20 Man, Côte d'Ivoire

⁴Laboratoire des Structures de la Matière, de l'Environnement et de l'Énergie Solaire (LASMES), UFR SSMT, Université Félix Houphouët-Boigny, 22 BP 582 Abidjan, Côte d'Ivoire

Reçu : 08 Septembre 2025 / Reçu sous sa forme révisée : 05 Novembre 2025 / Accepté : 13 Décembre 2025

Résumé :

Les tendances temporelles des émissions anthropiques de CH₄ en Afrique de l'Ouest issues des données EDGAR pour la période 1970-2023 ont été analysées à l'aide d'une technique de clustering. Les méthodes de Liebmann et de segmentation de Hubert ont été utilisées pour caractériser les séries temporelles de chaque cluster et identifier les points de rupture ainsi que les modes de variabilité dans les émissions anthropiques. Cette approche a permis de distinguer trois clusters décrits comme suit: Cluster 1 (Bénin, Cap-Vert, Gambie, Guinée-Bissau, Libéria, Mauritanie, Sénégal, Sierra Leone et Togo) caractérisé par une faible émission; Cluster 2 (Côte d'Ivoire, Ghana, Guinée, Burkina Faso et Mali) indiquant une émission intermédiaire; et Cluster 3 (Nigéria) caractérisé par une forte émission. Les taux de croissance moyens d'émissions valent respectivement $19,27 \pm 5,78$ Gg an⁻¹, $64,18 \pm 19,25$ Gg an⁻¹ et $43,49 \pm 13,04$ Gg an⁻¹ pour les clusters 1, 2 et 3. Les résultats indiquent que le nombre de points de rupture varie entre 1 et 3, avec des durées et des intensités différentes. Le Cluster 3 présente le plus petit nombre de points de rupture (1), tandis que le Cluster 2 présente le plus grand (3). Par ailleurs, une analyse des tendances basée sur la régression linéaire par ajustement des moindres carrés montre l'existence de deux modes de variabilité: une variabilité basse fréquence (fenêtres temporelles > 35 ans) caractérisée uniquement par une augmentation progressive des émissions; et une variabilité haute fréquence (fenêtres temporelles ≤ 20 ans) associée à une alternance positive et négative, traduisant des fluctuations importantes à petite échelle temporelle.

Mots-clés : Émissions anthropiques de méthane ; Afrique de l'Ouest ; Analyse de tendances temporelles ; Clustering ; Points de rupture.

*Auteur correspondant:

Adresse e-mail : ttouredro017@gmail.com (D. T. Tiémoko)
<https://doi.org/10.70974/mat09225221>

Abstract:

Temporal trends in anthropogenic CH₄ emissions over West Africa derived from EDGAR data for the period 1970–2023 were analyzed using a clustering technique. The Liebmman method and Hubert segmentation were employed to characterize the time series within each cluster and to identify breakpoints as well as modes of variability in anthropogenic emissions. This approach made it possible to distinguish three clusters, described as follows: Cluster 1 (Benin, Cape Verde, The Gambia, Guinea-Bissau, Liberia, Mauritania, Senegal, Sierra Leone, and Togo), characterized by low emissions; Cluster 2 (Côte d’Ivoire, Ghana, Guinea, Burkina Faso, and Mali), exhibiting intermediate emission levels; and Cluster 3 (Nigeria), characterized by high emissions. The mean emission growth rates were estimated at $19.27 \pm 5.78 \text{ Gg yr}^{-1}$, $64.18 \pm 19.25 \text{ Gg yr}^{-1}$, and $43.49 \pm 13.04 \text{ Gg yr}^{-1}$ for Clusters 1, 2, and 3, respectively. The results indicate that the number of breakpoints ranges from one to three, with different durations and intensities. Cluster 3 exhibits the smallest number of breakpoints (one), whereas Cluster 2 shows the largest (three). Furthermore, a trend analysis based on least-squares linear regression reveals the existence of two modes of variability: a low-frequency variability (time windows > 35 years), characterized exclusively by a gradual increase in emissions; and a high-frequency variability (time windows ≤ 20 years), associated with alternating positive and negative phases, reflecting significant short-term fluctuations.

Keywords: Anthropogenic methane emissions; West Africa; Temporal trend analysis; Clustering; Breakpoints.

1. Introduction

Les changements climatiques, évidents à l’échelle mondiale, deviennent de plus en plus perceptibles aux niveaux régional et local. Le rythme et l’ampleur des variations diffèrent selon les régions et les variables climatiques (température, pluviométrie, etc.). De 2011 à 2020, la température moyenne mondiale dépassait de 1,09 (0,95–1,20) °C celle de 1900–1950 [1, 2]. Entre 2013 et 2022, le réchauffement dû aux activités humaines a augmenté en moyenne de 0,02 °C par an [3], un signal particulièrement marqué dans les régions tropicales. Les gaz à effet de serre (GES), émis en quantité croissante depuis la révolution industrielle (1750), sont les principaux responsables de ce réchauffement observé. Leur accumulation a entraîné une hausse du forçage radiatif (FR) atmosphérique d’environ $3,3 \text{ W m}^{-2}$ depuis l’ère industrielle jusqu’en 2022 [2]. Le dioxyde de carbone (CO₂) est le plus abondant de ces GES, mais le méthane (CH₄), bien que moins présent, possède un pouvoir de réchauffement global 28 à 36 fois supérieur à celui du CO₂ sur 100 ans [1]. Il

contribue à 19% de l’augmentation du FR et sa concentration atmosphérique est passée de 722 ppb en 1750 à plus de 1922 ppb en 2023, soit 266% par rapport au niveau préindustriel, principalement en raison des activités humaines [4, 5]. Contrairement au CO₂, le CH₄ a une durée de vie plus courte (environ 12 ans), ce qui en fait une cible prioritaire pour des actions d’atténuation et un ralentissement rapide du réchauffement de l’atmosphère [5].

À l’instar des autres régions, les impacts du changement climatique sont particulièrement marqués en Afrique de l’Ouest. Entre 1968 et 1972, la région a connu une rupture nette des régimes pluviométriques et hydrométriques, avec une baisse des précipitations de 15% à plus de 30% et un déplacement des isohyètes d’environ 200 km vers le sud [6]. Les débits moyens des grands fleuves ont chuté de 40 à 60%, réduisant fortement les zones humides naturelles. Les événements extrêmes (sécheresse, changements brusques de température, précipitation extrême, etc.) deviennent plus fréquents, causant d’énormes pertes en vies humaines et

économiques, comme lors des inondations de 1999 liées au bassin du Niger. Les périls climatiques en Afrique de l'Ouest sont donc sérieux. Les impacts déjà enregistrés sont importants. On pourrait s'attendre aux scénarios les plus sinistres si les variations observées au cours de ces dernières décennies devaient se maintenir ou s'aggraver dans les années à venir.

Par ailleurs, la région contribue de manière significative aux émissions globales de CH_4 , principalement via trois sources anthropiques majeures : l'agriculture, la gestion des déchets et le secteur énergétique [5]. Cette tendance est exacerbée par la croissance démographique rapide, l'urbanisation non maîtrisée et l'expansion des terres agricoles au détriment des forêts [7]. Bien que les émissions de CH_4 soient bien documentées à l'échelle mondiale, les études régionales sur les émissions et le bilan de CH_4 en Afrique de l'Ouest restent toutefois rares, fragmentaires et présentent des défis en raison de la variabilité et des incertitudes des données disponibles. Lunt *et al.* [8] ont estimé les émissions de méthane en Afrique tropicale entre 1,1 et 2,5 $\text{Tg} \cdot \text{an}^{-1}$ entre 2010 et 2016. Cette augmentation a été attribuée en grande partie à l'expansion des zones humides. Yapo *et al.* [9] ont évalué les émissions de méthane de la décharge d'Akouédo (Abidjan) à partir de modèles théoriques, mais avec de fortes incertitudes liées aux données locales et *in situ*. En utilisant des séries temporelles *in situ* de concentration atmosphérique de CH_4 de la station de Lamto (Côte d'Ivoire) de 2008 à 2018, Tiémoko *et al.* [6] ont obtenu un taux de croissance de 7 ppb an^{-1} , avec des concentrations supérieures à celles de nombreuses stations mondiales, confirmant ainsi l'influence combinée des activités anthropiques et des sources naturelles (par exemple, les feux de biomasse, les zones humides, etc.) sur la production de ce gaz.

Le cycle de CH_4 demeure encore peu documenté en Afrique, notamment en Afrique de l'Ouest, rendant difficile

l'estimation de sa contribution au bilan global. Cette étude analyse les tendances spatio-temporelles des émissions anthropiques de CH_4 en Afrique de l'Ouest entre 1970 et 2023, identifie les principaux secteurs émetteurs et évalue leur sensibilité aux facteurs socio-économiques et climatiques, à partir des données d'inventaires d'émissions EDGAR et d'analyses statistiques de tendance.

Ce travail est structuré comme suit : la section 2 décrit la zone d'étude, le matériel et la méthode utilisés. La section 3 présente les résultats des tendances. Les conclusions et perspectives sont présentées dans la dernière section.

2. Matériel et méthodes

2.1. Description de la zone d'étude

Située entre 4°N–25°N de latitude et 20°O–15°E de longitude, l'Afrique de l'Ouest est composée de 16 pays : le Bénin, le Burkina Faso, le Cap-Vert, la Côte d'Ivoire, la Gambie, le Ghana, la Guinée, la Guinée-Bissau, le Libéria, le Mali, la Mauritanie, le Niger, le Nigéria, la Sierra Leone, le Sénégal et le Togo (Figure 1).

La région s'étend sur une superficie d'environ 6 millions de km^2 . Sur une population totale d'environ 456 millions d'habitants [11], environ 75% vit dans des zones tropicales humide et subhumide au sud, et 25% dans des zones sahéliennes semi-aride et aride au nord [12]. Les populations, en majorité rurales, dépendantes d'une agriculture pluviale à base de céréales dans les zones subhumides et semi-arides et du pastoralisme dans les zones arides, demeurent fortement vulnérables à la variabilité et au changement climatique. Le climat d'Afrique de l'Ouest est non seulement caractérisé par un fort gradient pluviométrique latitudinal qui détermine les systèmes de production, mais aussi par les fluctuations dramatiques dans le régime des précipitations à des échelles de temps multidécennaires, ce qui amplifie cette variabilité annuelle pluviométrique déjà substantielle.



Fig. 1. Présentation de la zone d'étude (tiré de Tano *et al.* [10]).

2.2. Données

La base de données EDGAR v8.1 (Emission Database for Global Atmospheric Research) est un inventaire d'émission fournissant des données issues des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , N_2O) et de polluants (CO , etc.). Les inventaires EDGAR sont basés sur des statistiques internationales et des meilleurs facteurs d'émission disponibles conformément aux lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre [13] mises à jour en fonction des dernières connaissances scientifiques. Ces inventaires intègrent un large éventail d'informations (inventaires nationaux, activités sectorielles, données énergétiques et industrielles, données démographiques, transports), ce qui limite les biais liés à la taille démographique ou économique. Cela permet de comparer les profils d'émissions des pays indépendamment de leur taille géographique ou économique. La couverture globale et les séries chronologiques continues constituent les points forts de la base de données EDGAR. Ces données sont fournies pour chaque secteur d'activité par pays sur la

période de 1970 à 2023 sur une grille de résolution $0,1^\circ \times 0,1^\circ$. Dans cette étude, les données sont des séries chronologiques des émissions annuelles de méthane (CH_4) provenant de ces 16 pays d'Afrique de l'Ouest. Ces séries des émissions annuelles sont obtenues en agrégeant par simple cumul les émissions annuelles de chaque secteur (énergie, agriculture, déchets, etc.) au niveau national. Les données utilisées dans cette étude sont en accès libre et disponibles à l'adresse suivante: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/dataset_ghg2024, précisément dans l'onglet « Annual Totals by sector and country (1970–2023) ». Les scripts utilisés pour le traitement et l'analyse des données sont fournis dans un fichier supplémentaire.

2.3. Méthodes

2.3.1. Méthode de clustering

Le clustering est une technique statistique multivariée conçue pour explorer la structure dans un ensemble de données dont les propriétés ne sont pas connues *a priori* [14]. Cette technique vise à regrouper les données en clusters significatifs en maximisant la similarité au sein de chaque clus-

ter tout en augmentant les différences entre les clusters. Bien que divers algorithmes de clustering existent, nous avons utilisé le clustering hiérarchique sur composantes principales (CHCP). Cette approche réalisée avec la fonction *HCPC* du package *FactoMineR* (version 4.3.2) du langage de programmation R, combine les trois méthodes standard utilisées en analyse multivariée (l'analyse en composantes principales (ACP), la classification hiérarchique et la méthode des k-moyennes). Dans la fonction *HCPC*, l'ACP est utilisée en amont afin de réduire la dimensionnalité des données tout en conservant la majeure partie de la variance initiale. Les axes associés à des valeurs propres ≥ 1 sont considérés comme principaux. Par ailleurs, la détermination du nombre optimal de clusters K est une étape clé dans l'analyse de clustering. De nombreuses méthodes ont été proposées à cet effet [15,16], parmi lesquelles nous avons utilisé la méthode de « variance expliquée / critère du coude ». Cette méthode, dérivée de l'algorithme k-moyennes, est automatisée et son application sur des ensembles de données multidimensionnelles est

robuste [15,16]. Elle repose sur la somme des carrés intra-clusters, qui mesure la variance totale des observations à l'intérieur de chaque cluster. L'objectif est de minimiser la somme des distances au carré entre les points de données et leurs centroïdes respectifs, la distance euclidienne étant utilisée comme métrique de référence. La courbe obtenue (Figure 2) pour une série de valeurs de K clusters (2–10), appliquée à la série temporelle des émissions de CH_4 , présente un point d'inflexion. Ce point d'inflexion est considéré comme représentant le nombre optimal de clusters. Dans notre étude, l'inflexion est nette à $k = 3$, ce qui indique que trois clusters constituent une partition pertinente des données expliquant la majeure partie de la variance. Il convient de noter que d'autres approches ont également été testées (par exemple, la méthode des écarts pondérés, les statistiques de silhouette). Dans chaque cas, le nombre optimal de clusters identifié était également égal à 3 (voir Figures A1 et A2 en Annexe), confirmant la stabilité de la structure de regroupement.

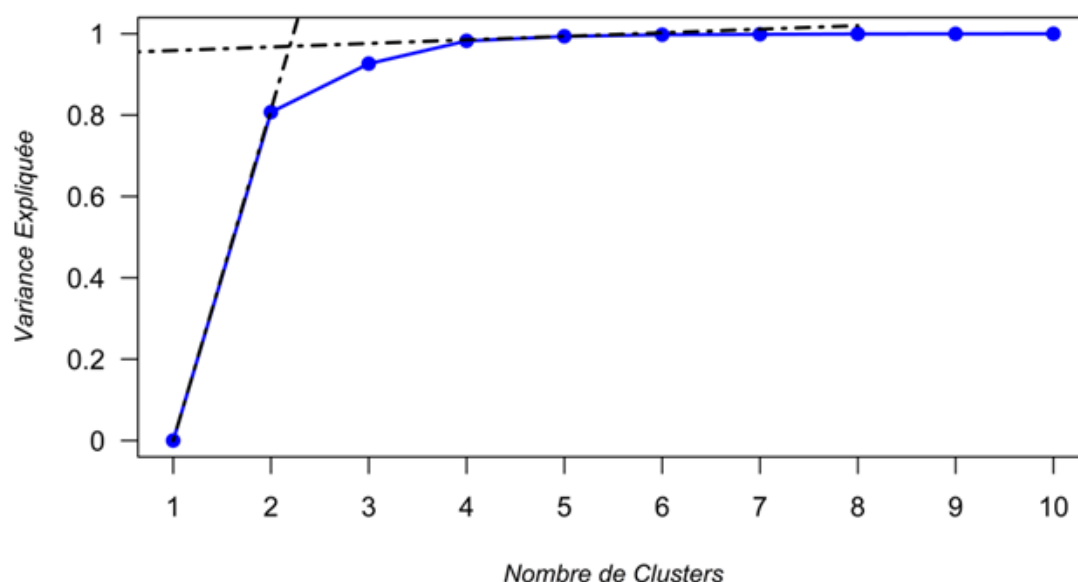


Fig. 2. Application de la méthode « variance expliquée / critère du coude » pour déterminer le nombre approprié de clusters.

Note: L'axe des abscisses représente le nombre de clusters et celui des ordonnées représente la variance expliquée au sein de chaque cluster. La sécante entre les deux tangentes (courbe noire en tiret) donne le nombre de clusters k (dans ce cas $k = 2, 3$).

Par ailleurs, bien que l'utilisation des données d'inventaire EDGAR permette de limiter les biais liés à la taille démographique ou économique de chaque pays, nous reconnaissons un effet d'échelle résiduel. L'impact de cet effet a été évalué en analysant explicitement la sensibilité du regroupement à des données normalisées par habitant et par PIB (Figures A3 et A4 en Annexe). Les résultats issus de ces normalisations confirment les tendances précédemment observées (Figure 2), renforçant ainsi la robustesse de la classification obtenue.

2.3.2. Segmentation de Hubert pour la rupture de tendance

L'évolution temporelle des émissions annuelles de CH₄ au sein des différents clusters peut présenter des points de rupture qui traduisent des changements dans le régime de ce paramètre. Pour mettre en évidence ces variations probables dans le cumul des émissions annuelles de CH₄, la segmentation d'Hubert a été utilisée pour sa robustesse et sa capacité à détecter plusieurs ruptures dans une série temporelle. Cette technique décompose la série initiale en deux ou plusieurs sous-séries temporelles et met en évidence la présence ou l'absence d'un ou plusieurs points de rupture caractéristiques dans la dynamique du paramètre étudié.

L'algorithme utilise une procédure en cinq étapes : initialisation, détection des ruptures, test de signification, segmentation récursive et obtention de segments homogènes. À chaque itération, un test de différence moyenne est appliqué aux points de rupture potentiels, et celui qui maximise le contraste entre les sous-séries est retenu. Le test de signification est effectué à un seuil de 1% (niveau de confiance de 99%) selon le test de Scheffé. Le critère global minimisé est défini par l'équation (1) :

$$J(m) = \sum_{k=1}^{m+1} \sum_{i \in I_k} (x_i - \bar{x}_k)^2 + \text{pen}(m) \quad (1)$$

Le premier terme mesure la qualité d'ajustement intra-segment, le second terme pénalise le nombre de ruptures $\text{pen}(m) =$

λm , fonction de pénalisation avec $\lambda = k\sigma^2$. σ^2 représente la variance résiduelle estimée et k , compris entre 1 et 3, permet de limiter la sur-segmentation en tenant compte de la variance résiduelle. Bien que l'autocorrélation temporelle soit implicitement prise en compte par le choix d'une longueur minimale de segment, évitant ainsi la détection de ruptures trop rapprochées, et par la segmentation récursive, qui garantit l'homogénéité statistique des sous-séries, des tests statistiques supplémentaires, à savoir le test d'Augmented Dickey-Fuller (ADF) et le test de Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS) ont également été appliqués pour évaluer la stationnarité des séries chronologiques. Cette méthode a été utilisée dans de nombreuses études sur la composition atmosphérique et le climat en Afrique de l'Ouest (par ex. [17,18]).

2.3.3. Méthode de Liebmann

Une analyse des tendances à long et à court termes des émissions de CH₄ est fournie en utilisant un diagnostic statistique basé sur la régression linéaire simple par l'ajustement des moindres carrés [19]. Les tendances sont calculées en multipliant la pente des tendances linéaires par la durée de la série chronologique, ce qui permet d'obtenir la variation totale des émissions sur la période étudiée. Ici, les tendances les plus significatives sont obtenues avec un niveau de confiance de 95% par le test t de Student. Cette méthode montre des performances robustes et spécifiques pour déterminer objectivement une ou plusieurs ruptures de tendance dans la série temporelle lorsqu'elles se produisent. La méthode de Liebmann est particulièrement bien adaptée aux séries environnementales et climatiques, car elle est très robuste face aux fluctuations interannuelles et permet de distinguer clairement les signaux à basse fréquence (tendances à long terme) des signaux à haute fréquence (variabilité à court terme). Elle a été largement utilisée dans la détermination et l'analyse des tendances climatiques et des gaz à effet de serre en Afrique de l'Ouest, en particulier pour quantifier les

changements de température, les précipitations et les émissions de GES [6, 19, 20].

3. Résultats et discussion

3.1. Analyse des clusters

La figure 3 présente la classification des pays de l'Afrique de l'Ouest en différents clusters. Sur cette figure, le plan factoriel constitué de l'axe Dim1 représente 92,69% de l'inertie totale et la valeur propre associée est supérieure à 1. Par conséquent, cette dimension se révèle suffisante pour traduire l'essentiel de l'inertie. Par ailleurs, l'application de l'analyse de clustering aux émissions anthropiques annuelles de CH₄ en Afrique de l'Ouest sur la période 1970–2023 a permis d'identifier 3 clusters (1, 2 et 3) (Figure 2) : Le premier cluster (Cluster 1), en noir sur la Figure 3, comprend 9 pays : Bénin (1), Cap-Vert (3), Gambie (5), Guinée-Bissau (8), Libéria (9), Mauritanie (11), Sénégal (14), Sierra Leone (15) et Togo (16). Ces pays sont regroupés autour de l'origine du plan factoriel et de l'axe Dim 1, indiquant une forte similitude. Ce cluster rassemble des pays à faible population, comprise entre 0,5 et 19 millions d'habitants. Ils présentent une forte dépendance à l'agriculture et aux ressources naturelles. Les pays appartenant au Cluster 1 (Cluster à Faible Émission) sont situés le long de la côte ouest-africaine et partagent des similitudes géographiques. Cette proximité suggère un profil socio-économique similaire.

Le deuxième cluster (Cluster 2), Cluster à Émission Intermédiaire, en rouge sur la figure 3, est formé de 6 pays : Burkina Faso (2), Côte d'Ivoire (4), Ghana (6), Guinée (7), Mali (10), Niger (12). On observe que les pays de ce cluster, en plus d'être regroupés sur l'axe horizontal, présentent une certaine dispersion aussi sur l'axe vertical. Cette répartition présente un contraste qui traduit une diversité interne. On note dans ce cluster un sous-groupe de pays sahéliens (Mali, Burkina Faso et Niger) se trouvant au nord de l'Afrique de l'Ouest avec

une croissance démographique rapide, une économie tributaire de l'agriculture et à fort risque climatique. Un sous-groupe de pays (Côte d'Ivoire, Ghana, Guinée) situé sur la côte, qui tirent profit de leurs ressources naturelles (gaz naturel, pétrole, etc.) et des échanges commerciaux assurés principalement par les ports.

Le troisième cluster (Cluster 3), Cluster à Forte Émission, représenté en vert sur la figure 3, est constitué uniquement du Nigéria (13). Isolé des autres pays sur la Figure 3, il se caractérise clairement par sa position éloignée par rapport à l'origine du plan factoriel, et est aussi parfaitement bien projeté sur l'axe principal (axe Dim 1), traduisant ainsi sa spécificité par rapport aux autres clusters. En effet, le Nigéria est le pays le plus peuplé d'Afrique de l'Ouest avec une population estimée à environ 232 millions d'habitants, représentant la moitié de la population de l'Afrique de l'Ouest [11]. Son produit intérieur brut (PIB) représentant, en 2023, 25% de celui du continent et 66% de celui de la CEDEAO, est nettement supérieur à celui des autres pays de la région [21]. Son poids économique (agriculture, industries pétrolière et gazière) et sa démographie le distinguent des autres.

3.2. Analyse de la tendance de CH₄ associée à chaque cluster

La figure 4 montre l'évolution temporelle des émissions anthropiques de CH₄ des Cluster 1 (en noir), Cluster 2 (en rouge) et Cluster 3 (en vert) sur la période 1970–2023. Les Tableaux 1, 2 et 3 présentent les principales sources d'émissions par pays. Chaque source représente au moins 5% des émissions totales du pays. Ces émissions ont présenté plusieurs évolutions dans le temps. Entre 1970 et 1974, les émissions du Cluster 3 ont enregistré une augmentation tandis que les deux autres clusters ont indiqué une légère diminution. De 1974 à 1980, on observe une stagnation des émissions du Cluster 3 suivie d'une légère diminution jusqu'en 1983.

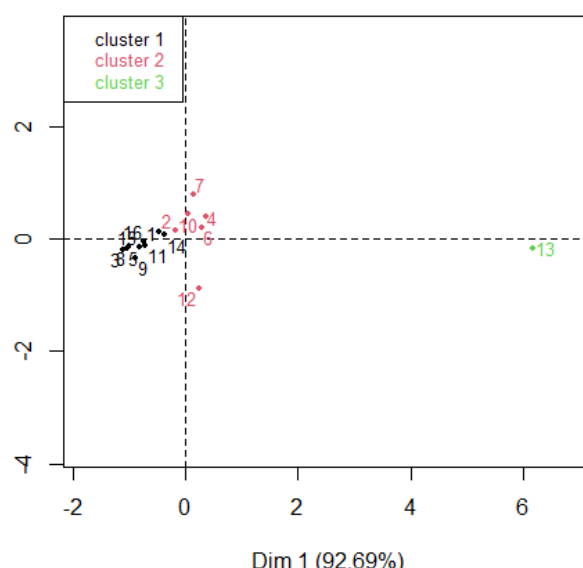


Fig. 3. Classification des pays de l'Afrique de l'Ouest en différents clusters.

Note: Pour la représentation, les numéros sont attribués aux différents pays : 1-Bénin, 2-Burkina Faso, 3-Cap-Vert, 4-Côte d'Ivoire, 5-Gambie, 6-Ghana, 7-Guinée, 8-Guinée-Bissau, 9-Libéria, 10-Mali, 11-Mauritanie, 12-Niger, 13-Nigéria, 14-Sénégal, 15-Sierra Leone, 16-Togo.

À partir de 1983, les émissions du Cluster 3 sont soudainement reparties à la hausse et l'augmentation s'est maintenue durant les années suivantes jusqu'au pic observé en 1996 (10694,953 Gg), coïncidant avec l'expansion massive de l'industrie pétro-gazière représentant 63,23% des sources d'émission de CH_4 du Nigéria (voir Tableau 3), l'exode rural et la prolifération de décharges non contrôlées autour des mégapoles [22]. De plus, la population du pays a connu une explosion démographique fulgurante et, avec l'urbanisation, la pression et la surexploitation des infrastructures existantes se sont accrues [23]. Une diminution brusque au taux de $120 \pm 36 \text{ Gg} \cdot \text{an}^{-1}$ marquée par une importante ondulation décennale s'en est suivie jusqu'en 2023, montrant une marge d'atténuation rapide via la réglementation des émissions fugitives. Cette ondulation peut aussi refléter des facteurs macroéconomiques et des décisions de torchage [23]. Selon Giwa *et al.* [24], un peu plus de 51% du gaz produit sur une période de cinq décennies aurait été torché en 2015 en dépit des efforts délibérés du gouvernement pour réduire le torchage de gaz. Malgré cette diminution observée après 1996,

le poids relatif du Nigéria reste écrasant et il émet toujours plus que l'ensemble des autres pays ouest-africains réunis.

Contrairement au Cluster 3, à partir de 1983, les émissions des Clusters 1 et 2 ont augmenté lentement jusqu'en 1995, ce qui correspond à une période de transitions agricoles et urbaines graduelles. Après cette période transitoire, une croissance quasi exponentielle s'en est suivie et s'est maintenue jusqu'en 2023 pour le Cluster 2. Cette tendance nette à l'augmentation reflète l'urbanisation accélérée des grandes villes et mégapoles, l'essor de l'élevage, la gestion insuffisante des déchets et le développement agro-industriel.

Les principales sources d'émission des différents pays représentées dans le Tableau 2 montrent que les pays sahéliens du Cluster 2 (Burkina Faso, Mali, Niger) contribuent significativement à cette tendance via la fermentation entérique (*code 3.A.1*) qui représente respectivement 65,5% et 85,1% des sources d'émission du Burkina Faso et du Niger, et la gestion des déjections animales (*code 1.A.4*) représentant 75,27% des sources du Mali (voir Tableau 2).

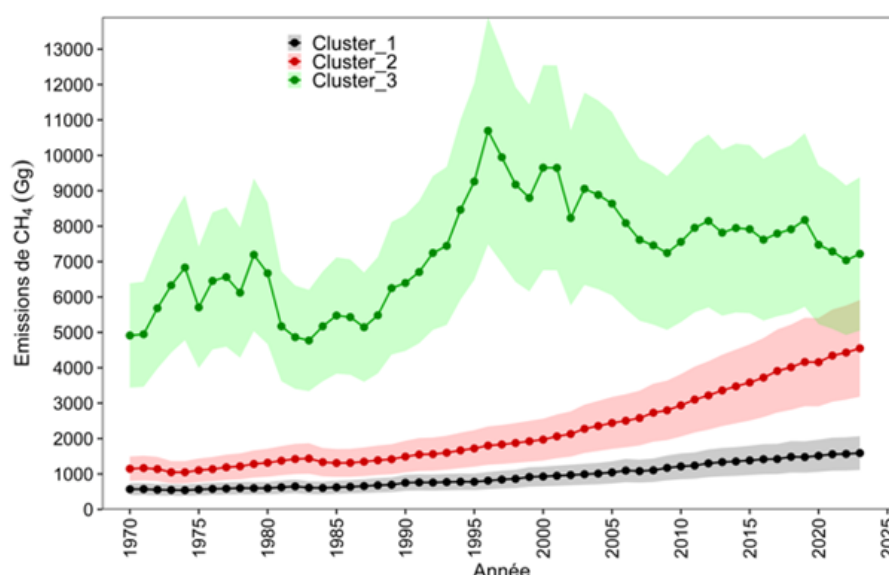


Fig. 4. Émissions annuelles anthropiques de CH₄ (en Gg) des différents clusters constitués des 16 pays de l'Afrique de l'Ouest sur la période 1970–2023.

Note: Les zones de couleur ombrées représentent la plage d'incertitude des émissions anthropiques de CH₄ associées à un intervalle de confiance de 95%.

En outre, les pays côtiers que sont la Côte d'Ivoire, le Ghana et la Guinée contribuent aussi via la fermentation entérique, représentant 22,14%, 26,89% et 37,15% des émissions respectives de ces pays, et les combustibles solides (charbon, biomasse, certains déchets solides) avec une contribution de 29,54% aux émissions de la Côte d'Ivoire et de 25,81% aux émissions du Ghana. Quant à la Guinée, l'une des principales sources est la culture du riz (code 3.C7) avec une contribution locale estimée à 29,62%. Après cette période transitoire (1983–1995), le Cluster 1 a présenté une pente d'émission un peu plus marquée avec une progression régulière mais lente, traduisant des économies à faible industrialisation. Dans ces pays du Cluster 1, les sources principales de CH₄ proviennent de la fermentation entérique (voir Tableau 1). Toutefois, les émissions de ces pays tendent à croître lentement avec l'urbanisation. Cette dynamique témoigne d'un accroissement démographique sans transformations massives dans les pratiques agricoles.

Par ailleurs, les émissions anthropiques de CH₄ montrent globalement une tendance à la hausse avec une variabilité interannuelle importante pour le Cluster 3. Pour ce cluster, de 1970 à 2023, la quantité de CH₄

émise est passée de $4913,12 \pm 1473,93$ Gg à $7218,23 \pm 2168,49$ Gg, soit une hausse de plus de 47% en l'espace de 54 ans. Okedere *et al.* [23] sont parvenus à la même conclusion. Ces auteurs ont indiqué une augmentation d'environ 25% en 2014 par rapport à leur valeur de 1990 des émissions de gaz à effet de serre au Nigéria. La quantité de CH₄ émise par le Cluster 1 est passée de 569,984 Gg à 1590,903 Gg, soit une hausse de plus de 179%. Quant au Cluster 2, les émissions sont passées de 1147,492 Gg à 4549,089 Gg, soit une hausse de plus de 296%, traduisant le dynamisme de l'économie de ces pays regroupés dans ce cluster. Des tendances similaires ont été rapportées par Mostefaoui *et al.* [25] sur la base des inventaires PRIMAP-hist couvrant l'ensemble du continent africain. Ces auteurs ont observé une augmentation de 5% des émissions anthropiques de CH₄ entre les périodes 1990–1999 et 2000–2009, suivie d'une augmentation de 14,8% entre 2000–2009 et 2010–2018. Selon leurs analyses, cette augmentation est principalement due à deux secteurs : l'agriculture, qui est la source dominante (+8%), et la gestion des déchets (+5%). Ils identifient également l'Afrique du Nord et l'Afrique subsaharienne occidentale comme les principales régions contribuant à cette

augmentation des émissions de CH₄. Ces différentes tendances donnent des taux de croissance d'environ $19,27 \pm 5,78 \text{ Gg an}^{-1}$ pour le Cluster 1, $64,18 \pm 19,25 \text{ Gg an}^{-1}$ pour le Cluster 2 et $43,49 \pm 13,04 \text{ Gg an}^{-1}$ pour le Cluster 3. Ces valeurs s'inscrivent dans une tendance globale à l'augmentation des émissions anthropiques de CH₄ dans la majorité des régions en développement, sous l'effet combiné de la croissance démographique, de l'urbanisation et de la pression accrue sur les systèmes agricoles et énergétiques.

Les taux observés en Afrique de l'Ouest sont comparables à ceux relevés dans plusieurs mégapoles en transition rapide, comme Lagos (EDGAR+GOSAT : 55 Gg an^{-1} ; ODIAC : 60 Gg an^{-1}) ou Londres (EDGAR : 50 Gg an^{-1} ; ODIAC : 70 Gg an^{-1}), mais restent nettement inférieurs à ceux obtenus dans les régions fortement industrialisées telles que New York (EDGAR : 170 Gg an^{-1} ; ODIAC : 190 Gg an^{-1}) ou Paris (EDGAR : 160 Gg an^{-1} ; ODIAC : 80 Gg an^{-1}) sur la période 1970–2021 selon Ohyama *et al.* [26] en utilisant différentes bases de données. Ces valeurs restent également en dessous de la moyenne

mondiale ($80\text{--}100 \text{ Gg an}^{-1}$) et surtout largement inférieures aux taux de croissance particulièrement élevés en Asie du Sud-Est ($\geq 150 \text{ Gg an}^{-1}$), où l'expansion rizicole et l'industrialisation rapide constituent des facteurs majeurs d'émissions. Ainsi, les trajectoires ouest-africaines se situent à un niveau intermédiaire dans le contexte global de la variabilité des émissions de méthane, traduisant une accélération régionale significative des émissions liées aux activités domestiques et au transport tout en restant inférieures aux gradients de croissance maximums observés à l'échelle internationale [27].

Il est important de noter que l'Afrique et le Moyen-Orient contribuent conjointement à environ 23,1% de l'augmentation mondiale des émissions de CH₄ [28]. La faible croissance des émissions du Cluster 1 de 1970 à 2023 suggère l'efficacité relative de politiques de développement ayant évité un emballement carbone contrairement aux autres trajectoires observées, ou traduit le faible développement des activités sources d'émission de CH₄. La figure 5 présente la distribution des émissions annuelles de CH₄ pour les trois clusters.

Tableau 1

Sources responsables d'au moins 5% des émissions annuelles de CH₄ pour chacun des pays du Cluster 1 (en gras, les principales sources).

Secteurs	Pays								
	Bénin	Cap-Vert	Gambie	Guinée-Bissau	Libéria	Mauritanie	Sénégal	Sierra Leone	Togo
Agriculture									
1.A.4	9,58	13,42	7,41	16,37	37,66	–	–	17,53	10,25
3.C.7	–	–	15,08	23,93	5,95	–	7,01	31,86	5,75
3.A.1	43,00	37,43	48,11	38,37	8,15	80,26	60,96	–	25,65
3.A.2	–	7,68	–	–	–	–	–	–	–
Transport									
1.A.3.d	8,91	–	–	–	–	–	–	–	–
Déchets									
4.D	13,79	13,18	9,98	6,12	–	–	9,34	7,96	10,88
4.A	–	14,84	5,58	5,16	11,82	–	–	–	5,81
Bâtiments									
1.B.1	17,43	10,61	10,90	7,06	25,01	–	–	16,61	38,63
1.A.5	6,76	–	–	–	–	–	–	–	–

Légende : Gestion des déjections animales (1.A.4) ; Culture du riz (3.C.7) ; Fermentation entérique (3.A.1) ; Navigation maritime (1.A.3.d) ; Traitement et rejet des eaux usées (4.D) ; Élimination des déchets solides (4.A) ; Combustibles solides (1.B.1) ; Pétrole et gaz naturel (1.B.2).

Tableau 2

Sources responsables d'au moins 5% des émissions annuelles de CH₄ pour chacun des pays du Cluster 2 (En gras, les principales sources).

Secteurs	Pays					
	Burkina Faso	Côte d'Ivoire	Ghana	Guinée	Mali	Niger
Agriculture						
1.A.4	10,4	12,39	9,81	13,15	75,27	–
3.C7	–	7,29	6,70	29,62	11,18	–
3.A.1	65,50	22,14	26,89	37,15	–	85,1
Transport						
1.A.3b	7,16	–	–	–	–	–
Déchets						
4.D	7,31	11,67	15,88	7,25	–	–
4.A	–	8,06	–	–	–	–
Industrie énergétique						
1.A1.bc	5,88	–	–	–	–	–
Buildings						
1.B.1	7,65	29,54	25,81	5,23	–	–
1.B.2	–	6,00	9,60	–	–	–

Légende : Gestion des déjections animales (1.A.4) ; Culture du riz (3.C.7) ; Fermentation entérique (3.A.1) ; Transport routier sans remise en suspension (1.A.3b) ; Traitement et rejet des eaux usées (4.D) ; Élimination des déchets solides (4.A) ; Combustibles solides (1.B.1) ; Pétrole et gaz naturel (1.B.2) ; Raffinage du pétrole - Fabrication de combustibles solides et autres industries de l'énergie (1.A1.bc).

Tableau 3

Sources responsables d'au moins 5% des émissions annuelles de CH₄ pour chacun des pays du Cluster 3.

Secteurs	Nigéria
Agriculture	
3.A.1	12,34
Bâtiments	
1.B.2	63,23

Légende : Fermentation entérique (3.A.1) ; Pétrole et gaz naturel (1.B.2).

Les valeurs médiane (826,8 Gg) et moyenne (932,6 Gg) des émissions annuelles du Cluster 1 sont relativement faibles. L'amplitude (écart interquartile) est réduite, traduisant une homogénéité des émissions au sein de ce cluster. Le Cluster 2 présente des valeurs médiane (1818 Gg) et moyenne annuelle (2204 Gg) deux fois plus élevées que celles du Cluster 1. Le Nigéria, isolé dans son propre cluster (i.e. Cluster 3), indique des émissions extrêmement élevées, avec une

médiane de 7364 Gg et une moyenne annuelle de $7253 \pm 2175,90$ Gg, et sont associées à une forte variabilité autour de la moyenne. Ces valeurs 4 fois supérieures à celle des autres clusters montrent que le Nigéria est le principal contributeur régional aux émissions anthropiques de CH₄, et sa trajectoire domine largement les émissions ouest-africaines. De plus, cette forte variabilité présentée par l'intervalle interquartile étendu reflète l'hétérogénéité de son économie. Par ailleurs, l'analyse des marges d'incertitude associées aux émissions de CH₄ en Afrique de l'Ouest révèle de fortes variations selon les clusters et les périodes. Le Cluster 1 et le Cluster 2 présentent une incertitude modérée mais persistante tout au long de la période, reflétant une variabilité annuelle constante ou des limites méthodologiques persistantes (par ex. techniques de collecte des données). Le Cluster 3 montre des bandes d'incertitudes très larges, en particulier entre 1995 et 2005, suggérant que la tendance réelle pourrait être significativement plus basse ou plus haute.

Le rétrécissement des intervalles de confiance pour la période la plus récente témoigne d'une meilleure quantification des émissions probablement due à l'amélioration des inventaires nationaux. Ces incertitudes montrent le besoin de mieux documenter les sources de CH₄ en Afrique de l'Ouest.

3.3. Analyse de ruptures et modes de variabilité de la tendance des émissions

Avant d'appliquer la segmentation d'Hubert à chaque cluster, la stationnarité et l'autocorrélation des séries chronologiques annuelles des émissions de CH₄ des Clusters 1, 2 et 3 ont été vérifiées. Les tests d'Augmented Dickey-Fuller (ADF) et de Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS) appliqués à chaque cluster ont montré une non-stationnarité (ADF : $p = 0,72$; $0,99$ et $0,76$; KPSS : $p = 0,01$, $0,01$ et $0,02$) des séries, justifiant ainsi deux différenciations successives pour obtenir des séries stationnaires. L'absence d'autocorrélation résiduelle après différenciation a été confirmée par le test de Ljung-Box ($p = 0,1048$ pour le Cluster 1, $p = 0,07$ pour le Cluster 2 et $p = 0,76$ pour le Cluster 3), attestant de l'indépendance temporelle des résidus. Par ailleurs, l'analyse temporelle des émissions annuelles de CH₄ révèle plusieurs changements dans la variabilité interannuelle de cer-

tains clusters au cours de la période étudiée. Ces changements, caractérisés par des points de rupture obtenus par le test statistique de segmentation d'Hubert [29], ont des durées et des intensités inégales (voir Tableau 4). Le nombre de ces points de rupture varie entre 1 et 3. La périodicité d'apparition de ces points de ruptures est comprise entre 2 et 11 ans. La périodicité et le nombre important de ces points de rupture sont globalement en accord avec les conclusions des travaux réalisés par Gonsan *et al.* [30] sur les émissions annuelles de CO₂ en Afrique de l'Ouest sur la période 1970–2015 pour certains pays. Cette étude a montré que le nombre de points de rupture de CO₂ variait entre 2 et 7 avec une périodicité d'apparition de 1 à 25 ans, indiquant ainsi plusieurs changements de régime dans les émissions anthropiques de CO₂. Par ailleurs, les nombres minimum (1 point) et maximum (3 points) de points de rupture sont observés respectivement par le Cluster 3 et le Cluster 2 dans l'évolution des séries chronologiques des émissions annuelles de CH₄. Toutefois, le premier point de rupture est observé par le Cluster 1 en 1996. Par ailleurs, le point de rupture apparaissant dans le régime des émissions annuelles du Cluster 3 est marqué par un saut brusque à la hausse (1990 et 1993) et des fluctuations plus fortes suivie d'une tendance à la baisse après 2005.

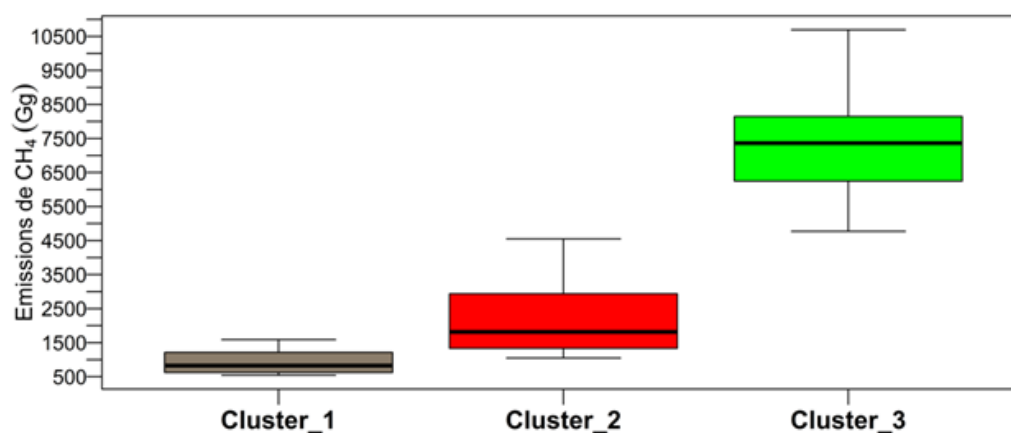


Fig. 5. Boîtes à moustaches des émissions annuelles de CH₄ associées à chaque cluster sur la période 1970–2023.

Note: La ligne dans ces boîtes représente la concentration médiane et les extrémités indiquent les quartiles inférieurs (25^e percentile) et supérieurs (75^e percentile).

La tendance à l'augmentation pourrait refléter des décennies d'instabilités socio-politiques que le Nigéria a connues [31]. Parmi celles-ci, les conflits récurrents dans le delta du Niger, notamment la crise Ogoni entre 1993 et 1995 qui a entraîné le sabotage d'oléoducs, une augmentation du torchage de gaz et des fuites massives de méthane [32]. La période du régime militaire de 1993 à 1998, marquée par un affaiblissement des mécanismes de contrôle environnemental, ainsi que la fragile transition politique vers la quatrième république en 1999, ont également contribué à la croissance non réglementée des activités agro-pastorales, des décharges urbaines et des émissions fugitives [33]. L'intensification des conflits agro-pastoraux dans la ceinture médiane au début des années 2000 a encore modifié les pratiques agricoles et pastorales, renforçant la variabilité des émissions observée dans le Cluster 3 [34]. Cette tendance à la baisse après 2005 serait liée à des mesures politiques courageuses visant à interdire certaines pratiques agricoles et la réglementation dans l'industrie pétro-gazière, principale source d'émission (63,5% des émissions) qui a connu une réduction de ces émissions (56%) de 2005 à 2023 [35, 36]. En effet, le Nigéria figure parmi les pays ayant réussi à réduire le torchage. En 2020, il occupait la 7^e place mondiale pour le torchage, contre la 2^e en 2005, et les volumes de gaz torchés ont chuté de 66% entre 2005 et 2015 [37]. De plus, l'instabilité liée à l'insurrection de Boko Haram (2009–2015), qui a perturbé l'activité économique dans le nord du pays ; les crises récurrentes dans le delta du Niger qui ont affecté la production de pétrole et de gaz (2006–2010), ainsi que les fluctuations de la production et les épisodes de rationnement des carburants qui ont une influence directe sur les émissions provenant des transports et de la combustion domestique peuvent expliquer certaines des variations observées. Toutefois, les différentes ruptures observées dans les deux autres clusters ont indiqué une augmentation des émissions à des vitesses différentes, qui pourraient être liées à la reprise économique et

à l'urbanisation rapide dans plusieurs pays de l'Afrique de l'Ouest.

Tableau 4

Identification de ruptures au sein de la tendance des émissions annuelles de CH₄ (1970–2023) à l'aide de la méthode de la segmentation d'Hubert (niveau de confiance : 99%).

Clusters	Années de rupture
Cluster 1	1996 ; 2007
Cluster 2	2001 ; 2020 ; 2022
Cluster 3	2005

Par ailleurs, une analyse des tendances à long terme à partir des anomalies est présentée à la figure 6. Cette figure montre toutes les tendances pour des périodes de 2 à 54 ans (durée totale de la série chronologique), associées à un niveau de confiance de 95% par le test-*t* de Student. Il est évident que les fenêtres temporelles de plusieurs années ou moins peuvent présenter un excès ou un déficit d'émissions annuelles de CH₄. On observe cependant une augmentation (tendance à la hausse des émissions) et/ou une diminution (tendance à la baisse des émissions) sur des fenêtres temporelles inférieures à 20 ans pour les trois Clusters (1, 2 et 3), alors que des fenêtres temporelles supérieures à 20 ans montrent systématiquement une hausse des émissions pour les Cluster 1 et Cluster 3 (> 250 Gg). En revanche, le Cluster 2 pour des fenêtres temporelles comprises entre 20 et 35 ans présente une phase transitoire marquée par une diminution et/ou une augmentation des émissions, et une tendance à la hausse pour des fenêtres temporelles supérieures à 35 ans. Les travaux de Ago *et al.* [38], et de Tiémoko *et al.* [6, 18] sur les flux et les concentrations de CH₄ et de CO₂ dans les différents sites en Afrique de l'Ouest sont parvenus à la même conclusion. Ces auteurs ont montré que des fenêtres temporelles plus grandes sont associées uniquement à une augmentation des concentrations et des flux de CH₄ et de CO₂, et des fenêtres temporelles plus courtes indiquent une alternance des changements positifs et négatifs des tendances du

CH₄ et du CO₂, traduisant des fluctuations importantes à petite échelle temporelle. Ils soulignent que la variabilité climatique d'une année sur l'autre dans cette sous-région est prononcée, ce qui pourrait avoir un impact sur les différents mécanismes d'émission et leurs sources. Deux modes caractéristiques de variabilité (haute et basse fréquences) sont alors observés pour évaluer l'amplitude des tendances d'émissions anthropiques de CH₄ en Afrique de l'Ouest. Ainsi, la variabilité basse fréquence (fenêtres temporelles > 35 ans) est associée uniquement à une augmentation des émissions annuelles de CH₄ tandis que la variabilité haute fréquence (fenêtres temporelles ≤ 20 ans) est associée à des valeurs positives et négatives relativement faibles. En outre, pour les trois clusters, nous notons que la variabilité basse fréquence indique des tendances positives significatives sur de nombreuses fenêtres temporelles. La variabilité à basse fréquence met en évidence une tendance structurelle à long terme, qui se manifeste par une augmentation persistante des émissions annuelles. Ce comportement pourrait s'expliquer par une dynamique socio-économique et environnementale profonde, notamment (i) la croissance démographique rapide en Afrique de

l'Ouest, passée de 107 millions d'habitants en 1970 à plus de 430 millions en 2023 [39], exerçant une pression sur l'agriculture, l'urbanisation et la gestion des déchets et entraînant une hausse des émissions diffuses de CH₄ ; (ii) l'expansion des superficies rizicoles de plus 200%, amplifiant les émissions liées aux sols inondés [40,41] ; (iii) la croissance du cheptel bovin et ovin de 2 à 3% par an, contribuant aux émissions entériques; (iv) l'urbanisation rapide (3,9% par an), favorisant l'augmentation des émissions issues des décharges ouvertes ; ainsi que (v) le développement des activités pétrolières et gazières pour le cas du Nigéria [25,42]. En revanche, la variabilité à haute fréquence (fenêtres temporelles allant jusqu'à 20 ans) reflète des fluctuations cycliques à court terme liées à des facteurs conjoncturels et climatiques. Elle inclut les sécheresses extrêmes, telles que celles de 1983–1984, 2011 et 2017, qui réduisent temporairement la saturation en eau du sol, les émissions des zones humides et de la culture du riz, et les anomalies ENSO (El Niño–Southern Oscillation) qui peuvent augmenter l'humidité du sol en Afrique de l'Ouest, stimulant ainsi la production microbienne de CH₄.

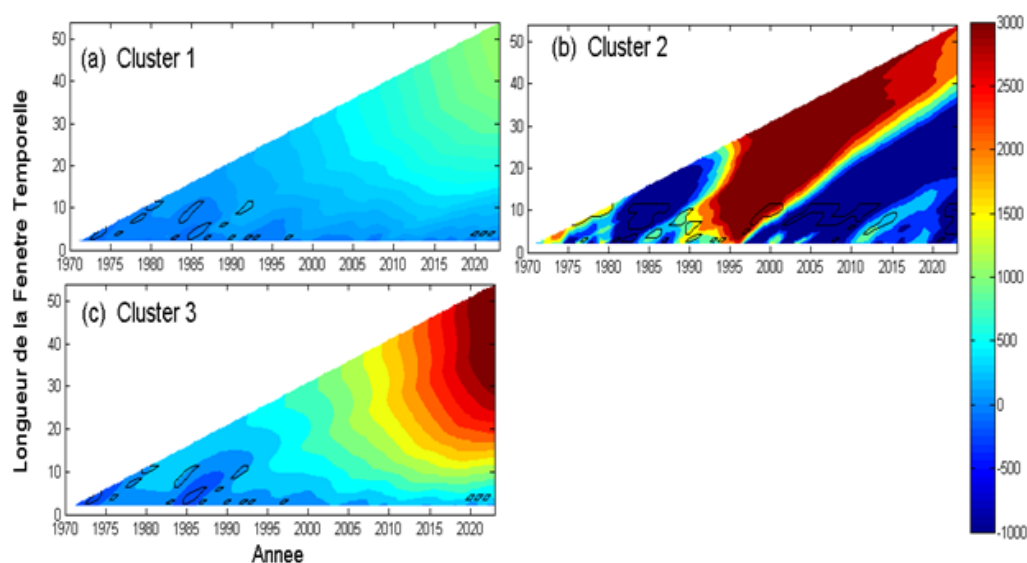


Fig. 6. Évolutions des tendances moyennes annuelles de CH₄ du Cluster 1 (a), du Cluster 2 (b) et du Cluster 3 (c) obtenues sur la période 1970–2023.

Note: Les contours en noirs fournissent la significativité à un niveau de confiance de 95% des différentes tendances obtenues à partir du test-*t* de Student.

Les variations annuelles du torchage dans les secteurs pétroliers peuvent générer des fluctuations de $\pm 50 \text{ Gg} \cdot \text{an}^{-1}$ en fonction de l'activité et des politiques de contrôle [43, 44]. En outre, les pertes de bétail dues aux sécheresses ou aux maladies pourraient modifier temporairement les émissions issues de la fermentation entérique. Enfin, les crises économiques ou politiques occasionnelles entraînent des baisses temporaires des émissions industrielles et urbaines, suivies d'une reprise rapide [42, 45].

4. Conclusion

Les émissions anthropiques de CH_4 dans 16 pays d'Afrique de l'Ouest de 1970 à 2023 ont été analysées à l'échelle annuelle à l'aide des données EDGAR en utilisant une analyse par cluster et des analyses statistiques. L'application de l'analyse de clustering aux émissions de CH_4 a permis d'identifier trois clusters (1, 2 et 3). Le Cluster 1 (56,25% des pays) constitué du Bénin, du Cap-Vert, de la Gambie, de la Guinée-Bissau, du Libéria, de la Mauritanie, du Sénégal, de la Sierra Leone et du Togo représente les pays à faibles niveaux d'émissions. Le Cluster 2 (37,50% des pays) constitué de la Côte d'Ivoire, du Ghana, de la Guinée, du Burkina Faso et du Mali représente les pays à émissions intermédiaires. Le Cluster 3 (6,25% des pays) constitué uniquement du Nigéria désigne les niveaux d'émissions élevés. Les résultats montrent que les émissions annuelles de CH_4 ont augmenté significativement d'environ 179%, 296% et 47% respectivement pour les Clusters 1, 2 et 3, reflétant la persistance de modèles de développement encore largement basés sur des pratiques à fortes intensités d'émissions, notamment dans les secteurs de l'énergie, de l'agriculture et des déchets. Une tendance en accord avec l'évolution du PIB par habitant sur la même période dans ces pays. Le Cluster 3 composé uniquement du Nigéria a montré des quantités de CH_4 4 fois plus élevées que les autres clusters, faisant de ce pays le principal contributeur régional aux émissions anthropiques de CH_4 . Ces résultats démontrent que des mesures d'atténuation

uniformes seraient insuffisantes. Une approche différenciée, adaptée aux spécificités de chaque cluster, s'impose : renforcement des capacités et prévention dans les pays à faibles émissions ; modernisation agropastorale et amélioration de la gestion des déchets dans les pays à émissions intermédiaires, et politiques strictes de régulation pétro-gazière, incluant le contrôle du torchage, pour le Nigéria. L'ajustement des politiques publiques aux dynamiques propres de chaque cluster constitue ainsi un levier essentiel pour infléchir durablement la trajectoire régionale des émissions de CH_4 . Toutefois, la promotion des énergies renouvelables en lieu et place des énergies fossiles, la transition vers des pratiques agricoles plus durables et le remplacement progressif des véhicules thermiques par des véhicules hybrides ou électriques représentent des options transversales susceptibles de réduire les émissions dans l'ensemble des pays étudiés.

L'analyse statistique utilisant la méthode de segmentation d'Hubert a mis en évidence les différents points de rupture et leur durée dans les séries chronologiques des émissions de CH_4 de chacun de ces clusters. L'application de cette méthode nous a permis d'identifier que les points de rupture dans les différentes séries chronologiques se situent dans l'intervalle [1 ; 3], indiquant plusieurs changements de régime dans les émissions anthropiques annuelles de CH_4 de 1970 à 2023 en Afrique de l'Ouest. Cependant, la série chronologique observée pour le Cluster 3 (1 point) présente le plus faible nombre de points de rupture, tandis que le Cluster 2 (3 points) présente le plus grand nombre de points de rupture.

Par ailleurs, les données EDGAR utilisées ici sont basées sur des inventaires, des modèles statistiques et des connaissances générées, présentant parfois des incertitudes en raison de la rareté des données de qualité. Cela peut conduire à une sous-estimation et/ou une surestimation des sources et des tendances de CH_4 dans la région. Ainsi, pour réduire les incertitudes, un réseau étendu de mesures des GES en Afrique constitue une observable privilégiée qui peut à

la fois aider à diagnostiquer l'impact des activités humaines et aider à modéliser les différentes composantes du cycle du carbone. À cet effet, la Station Géophysique de LAMTO (Côte d'Ivoire) a acquis une station de mesure et de surveillance en continu de CO_2 , CO et CH_4 depuis 2008. De plus, un analyseur (EM27/Sun) de la concentration

de CO_2 et de CH_4 sur toute la colonne atmosphérique sera installé à Lamto en 2026, ce qui permettra une vue plus complète de la dispersion des panaches de combustion de la biomasse pendant les périodes de feux, et la validation des observations satellitaires, contribuerait ainsi à réduire les incertitudes sur les émissions régionales.

Annexes

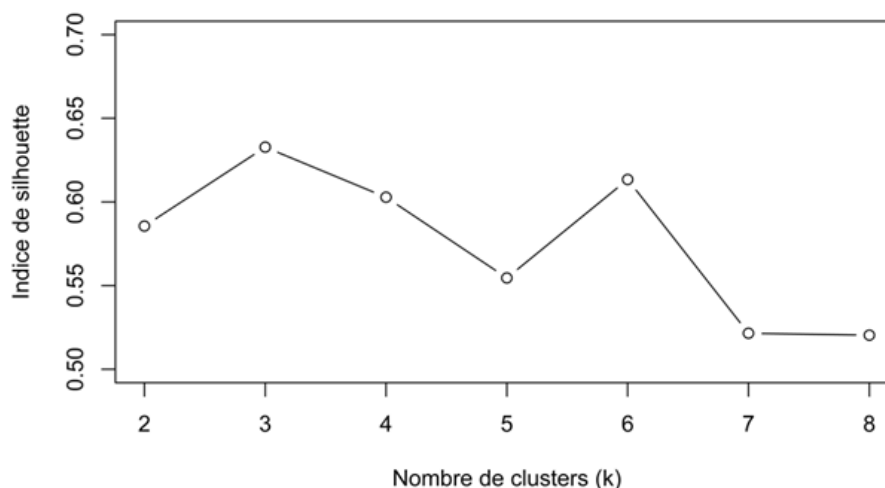


Fig. A1. Variation de l'indice de silhouette moyen en fonction du nombre de clusters (k).

Note: La valeur maximale de l'indice de silhouette est observée pour $k = 3$, avec une valeur d'environ 0,63.

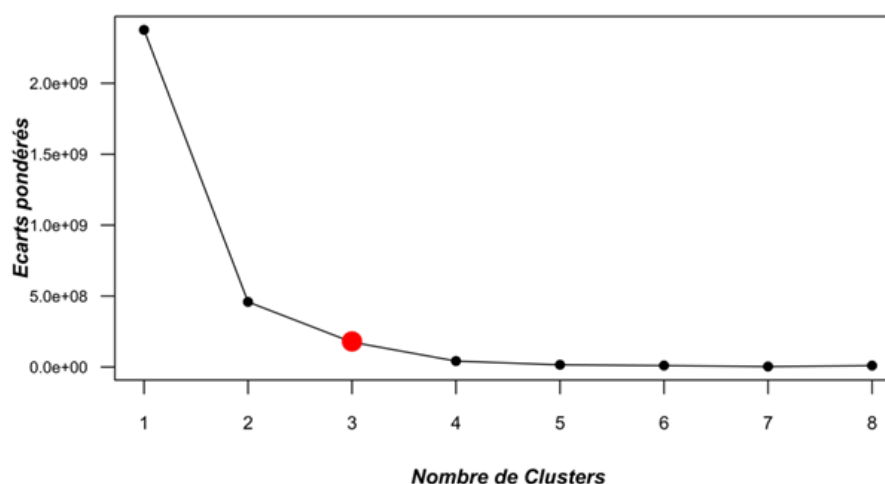


Fig. A2. Application de la méthode « écarts pondérés critères de coude » pour déterminer le nombre approprié de clusters.

Note: L'axe des abscisses représente le nombre de clusters et celui des ordonnées représente la somme de la distance euclidienne au sein de chaque cluster. Le nombre de clusters $k = 3$ (projeté du point rouge sur l'axe des abscisses).

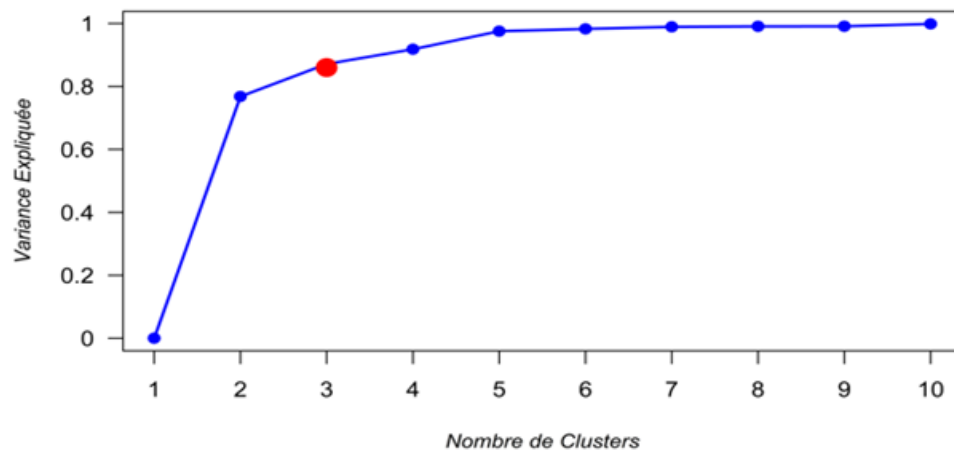


Fig. A3. Méthode « variance expliquée/critères de coude » pour déterminer le nombre approprié de clusters.

Note: L'axe des abscisses représente le nombre de clusters et celui des ordonnées représente la variance expliquée au sein de chaque cluster. Le projeté du point rouge sur l'axe des abscisses détermine le nombre de Clusters. Les données utilisées ont été normalisées par habitant. Le nombre de clusters $k = 3$ (projeté du point rouge sur l'axe des abscisses).

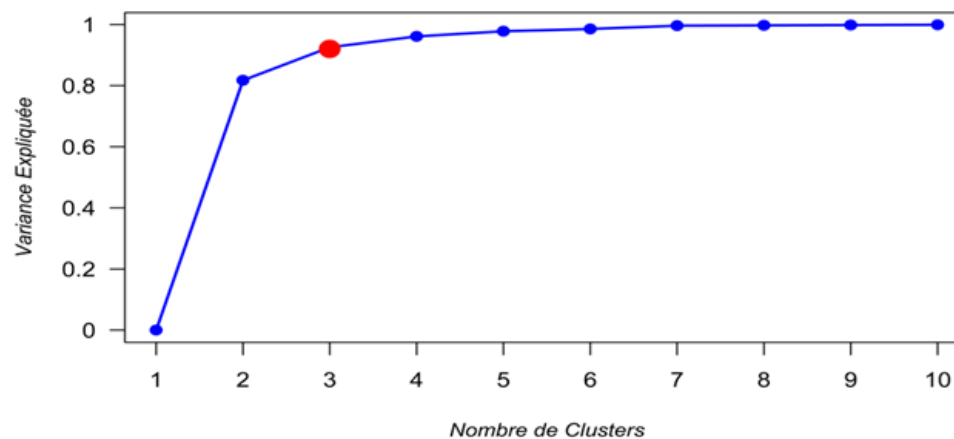


Fig. A4. Méthode « variance expliquée/critères de coude » pour déterminer le nombre approprié de clusters.

Note: L'axe des abscisses représente le nombre de clusters et celui des ordonnées représente la variance expliquée au sein de chaque cluster. Le projeté du point rouge sur l'axe des abscisses détermine le nombre de Clusters. Les données utilisées ont été normalisées par PIB. Le nombre de clusters $k = 3$ (projeté du point rouge sur l'axe des abscisses).

References

- [1] GIEC, *Résumé à l'intention des décideurs. In : Changement climatique 2021 : les bases scientifiques physiques. Contribution du Groupe de travail I au sixième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* [publié sous la direction de Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, et B. Zhou], Cambridge University Press, Cambridge, sixième Rapport (2021) 308.
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SummaryVolume_French.pdf
- [2] Z. Qi, R. Feng, *Global natural and anthropogenic methane emissions with approaches, potentials, economic costs, and social benefits of reductions: Review and outlook*, Journal of Environmental Management 373 (2025) 123568.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123568>
- [3] P.M. Forster, C.J. Smith, T. Walsh, W.F. Lamb, R. Lamboll, M. Hauser, A. Ribes, D. Rosen, N. Gillett, M.D. Palmer, J. Rogelj, K. Von Schuckmann, S.I. Seneviratne *et al.*, *Indicators of Global Climate Change 2022: annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence*, Earth Syst. Sci. Data 15(6) (2023) 2295–2327.
<https://doi.org/10.5194/essd-15-2295-2023>
- [4] OMM, *Bulletin annuel sur les gaz à effet de serre*, Genève, Bulletins scientifiques 19 (2023).
<https://library.wmo.int/idurl/4/68705>
- [5] M. Saunio, A.R. Stavert, B. Poulter, P. Bousquet, J.G. Canadell, R.B. Jackson, P.A. Raymond, E.J. Dlugokencky, S. Houweling, P.K. Patra, P. Ciais, V.K. Arora, D. Bastviken, P. Bergamaschi, D.R. Blake, G. Brailsford, L. Bruhwiler, K.M. Carlson, M. Carrol, S. Castaldi *et al.*, *Supplemental data of the Global Carbon Project Methane Budget 2019*, Global Carbon Project (2019).
<https://doi.org/10.18160/gcp-ch4-2019>
- [6] D.T. Tiémoko, M. Ramonet, F. Yoroba, K.B. Kouassi, K. Kouadio, V. Kazan, C. Kaiser, F. Truong, C. Vuillemin, M. Delmotte, B. Wastine, P. Ciais, *Analysis of the temporal variability of CO₂, CH₄ and CO concentrations at Lamto, West Africa*, Tellus B: Chemical and Physical Meteorology 73 (1) (2021) 1863707.
<https://doi.org/10.1080/16000889.2020.1863707>
- [7] UNEP, A. Olhoff, C. Bataille, J. Christensen, M. Den Elzen, T. Fransen, N. Grant, K. Blok, J. Kejun, E. Soubeyran, W. Lamb, K. Levin, J. Portugal-Pereira, M. Pathak, T. Kuramochi, C. Strinati, S. Roe, J. Rogelj, *Emissions Gap Report 2024: No more hot air ... please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments*, United Nations Environment Programme (2024) 1-100.
<https://doi.org/10.59117/20.500.11822/46404>
- [8] M.F. Lunt, P.I. Palmer, L. Feng, C.M. Taylor, H. Boesch, R.J. Parker, *An increase in methane emissions from tropical Africa between 2010 and 2016 inferred from satellite data*, Atmos. Chem. Phys. 19 (23) (2019) 14721–14740.
<https://doi.org/10.5194/acp-19-14721-2019>
- [9] S.L.H. Yapo, K.G. Kouadio, E.-M. Assamoi, V. Yoboué, J. Bahino, S. Keita, *Estimation of Methane Emissions Released from a Municipal Solid Waste*

- Landfill Site through a Modelling Approach: A Case Study of Akouédo Landfill, Abidjan (Côte d'Ivoire)*, International Journal of Science and Research (IJSR) 8(5) (2019) 1587–1593.
<https://doi.org/10.21275/ART20198118>
- [10] A.R. Tano, F.-X. D. B. Bouo, J.K. Kouamé, Y. Tchétché, S.D. Zézé, B. Ouattara, *Rainfall Variability and Trends in West Africa*, ACS 13(01) (2023) 72–83.
<https://doi.org/10.4236/acs.2023.131006>
- [11] G. Pison, S. Poniakina, *Tous les pays du monde (2024)*, Population & Sociétés, 626(9) (2024) 1–8.
<https://doi.org/10.3917/popsoc.626.0001>
- [12] CCAFS, l'Afrique de l'ouest - notre travail, (2025).
<https://ccafs.cgiar.org/fr/lafrique-de-louest-notre-travail>
- [13] GIEC, Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre, préparé par le Programme pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. et Tanabe K. (eds), IGES, Japon (2006).
- [14] M.R. Anderberg, *Cluster-analysis for applications*, Academic Press, New York (1973) 1–19.
- [15] L.S. Kalkstein, G. Tan, J.A. Skindlov, *An evaluation of three clustering procedures for use in synoptic climatology*, Journal of Climate and Applied Meteorology 26 (1987) 717–730.
[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1987\)026<0717:AEOTCP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1987)026<0717:AEOTCP>2.0.CO;2)
- [16] M. Yan, *Methods of Determining the Number of Clusters in a Data Set and a New Clustering Criterion*, Thèse, Faculty of the Virginia Polytechnic and State University, États-Unis (2005) 120.
- [17] O. Jorba, C. Pérez, F. Rocadenbosch, J.M. Baldasano, *Cluster Analysis of 4-Day Back Trajectories Arriving in the Barcelona Area, Spain, from 1997 to 2002*, Journal of Applied Meteorology 43(6) (2004) 887–901.
[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0887:caodbt>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0887:caodbt>2.0.co;2)
- [18] D.T. Tiémoko, F. Yoroba, J.D. Paris, A. Diawara, A. Berchet, I. Pison, A. Riandet, M. Ramonet, *Source-Receptor Relationships and Cluster Analysis of CO₂, CH₄, and CO Concentrations in West Africa: The Case of Lamto in Côte d'Ivoire*, Atmosphere 11 (9) (2020) 1–23.
<https://doi.org/10.3390/atmos11090903>
- [19] B. Liebmann, R.M. Dole, C. Jones, I. Bladé, D. Allured, *Influence of Choice of Time Period on Global Surface Temperature Trend Estimates*, Bulletin of the American Meteorological Society 91(11) (2010) 1485–1492.
<https://doi.org/10.1175/2010BAMS3030.1>
- [20] A.M. Kouassi, T.M.N. Bi, K.F. Kouamé, K.A. Kouamé, J.-C. Okaingni, J. Biemi, *Application de la méthode des simulations croisées à l'analyse de tendances dans la relation pluie-débit à partir du modèle GR2M : cas du bassin versant du N'zi-Bandama (Côte d'Ivoire)*, Géoscience 344(5) (2012) 288–296.
<https://doi.org/10.1016/j.crte.2012.02.003>
- [21] France Diplomatie, *Présentation du pays*, (2024).
<https://www.diplomatie.gouv.fr/fr/dossiers-pays/nigeria/presentation-du-nigeria/>
- [22] O.L. Bebetidoh, S. Kometa, K. Pazouki, R. Norman, *Sustained impact of the activities of local crude oil refiners on their host communities in Nigeria*, Heliyon 6(6) (2020) 1–9.

- <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04000>
- [23] O.B. Okedere, F.B. Elehinafe, S. Oyelami, A.O. Ayeni, *Drivers of anthropogenic air emissions in Nigeria - A review*, *Heliyon* 7(3) (2021) 1–13.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06398>
- [24] S.O. Giwa, C.N. Nwaokocha, S.I. Kuye, K.O. Adama, *Gas flaring attendant impacts of criteria and particulate pollutants: A case of Niger Delta region of Nigeria*, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences* 31(3) (2019) 209–217.
<https://doi.org/10.1016/j.jksues.2017.04.003>
- [25] M. Mostefaoui, P. Ciais, M.J. McGrath, P. Peylin, P.K. Patra, Y. Ernst, *Greenhouse gas emissions and their trends over the last 3 decades across Africa*, *Earth Syst. Sci. Data*. 16(1) (2024) 245–275.
<https://doi.org/10.5194/essd-16-245-2024>
- [26] H. Ohyama, Y. Yoshida, T. Matsunaga, *CH₄ and CO emission estimates for megacities: deriving enhancement ratios of CO₂, CH₄, and CO from GOSAT-2 observations*, *Environ. Res. Lett.* 19(12) (2024) 124025.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad71f2>
- [27] M. Crippa, D. Guizzardi, F. Pagani, M. Banja et al., *EDGAR v8.0 Greenhouse Gas Emissions*, European Commission, Joint Research Centre (JRC) 1 (2023).
<https://doi.org/10.2905/B54D8149-2864-4FB9-96B9-5FD3A020C224>
- [28] Y. Shan, K. Tian, R. Li, Y. Guan, J. Ou, D. Guan, K. Hubacek, *Global methane footprints growth and drivers 1990–2023*, *Nat Commun* 16(1) (2025) 1–13.
<https://doi.org/10.1038/s41467-025-63383-5>
- [29] P. Hubert, J.P. Carbonnel, A. Chaouche, *Segmentation des séries hydrométéorologiques – application à des séries de précipitations et de débits de l’Afrique de l’ouest*, *Journal of Hydrology* 110(3–4) (1989) 349–367.
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90197-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90197-2)
- [30] M.L. Gonsan, F.-X.D.B. Bouo, R.A. Tano, T.D. Tiémoko, A.J. Adon, K.J. Kouamé, Y. Tchétché, D.S. Zézé, B. Ouattara, Y. Kramo, F.N. Koffi, *Analysis of annual CO₂ gas emissions in West Africa*, *AES* 7(1) (2023) 1–5.
<https://doi.org/10.24966/AES-8780/100038>
- [31] E. Ukala, *Gas Flaring in Nigeria’s Niger Delta: Failed Promises and Reviving Community Voices*, Wash. & Lee J. Energy, Climate & Env’t 2(1) (2011) 97–126.
- [32] Amnesty International, *Nigeria: Are human rights in the pipeline?* (2004).
<https://www.amnesty.org/fr/wp-content/uploads/2021/08/afr440202004en.pdf>
- [33] A. Falode, *The Military and Political Development in Nigeria: The General Sani Abacha Regime, 1993–1998*, *Elk Asia Pacific Journal of Social Science* 4(4) (2018) 1–16.
<https://doi.org/10.16962/EAPJSS/sn.2394-9392/2015>
- [34] I.E. Bassey, E.E. Nta, E. Offiong, *Fulani herdsman/farmers conflict and the challenges of food security in the middle belt region of Nigeria*, *IJHI* 4(3) (2021) 134–139.
<https://doi.org/10.33750/ijhi.v4i3.132>
- [35] O.J. Olujobi, T.E. Yebisi, O.P. Patrick, A.I. Ariremako, *The Legal Framework for Combating Gas Flaring in Nigeria’s Oil and Gas Industry: Can It Promote Sustainable Energy Security*, *Sustainability* 14(13) (2022) 1–20.
<https://doi.org/10.3390/su14137626>

- [36] ECJRC et IEA, GHG emissions of all world countries, LU: Publications Office (2024).
<https://doi.org/10.2760/4002897>
- [37] E. Romson, K. McPhail, Super emitter gas flares in Nigeria, EnergyCC for Oxford Policy Management, Nigeria, summary (2023).
- [38] E.E. Ago, E.K. Agbossou, P. Ozer, M. Aubinet, *Mesure des flux de CO₂ et séquestration de carbone dans les écosystèmes terrestres ouest-africains (synthèse bibliographique)*, Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 20(1) (2016) 68–82.
<https://doi.org/10.25518/1780-4507.12565>
- [39] World Population Prospects, Methodology of the United Nations population estimates and projections, Summary of Results 10 (2024).
<https://reliefweb.int/report/world/world-population-prospects-2024-summary-results>
- [40] FAO, FAOSTAT Database – Crops and Livestock (Area harvested, Rice paddy) (2024).
<https://www.fao.org/faostat/>
- [41] J. Jiang, H. Zhang, J. Ge, L. Zuo, L. Xu, M. Song, Y. Ding, Y. Xie, W. Huang, *The 20 m Africa rice distribution map of 2023*, Earth Syst. Sci. Data 17(5) (2025) 1781–1805.
<https://doi.org/10.5194/essd-17-1781-2025>
- [42] S. Keita, C. Liousse, E.M. Assamoi, T. Doumbia, E.T. N'Datchoh, S. Gnamien, N. Elguindi, C. Granier, V. Yoboué, *African anthropogenic emissions inventory for gases and particles from 1990 to 2015*, Earth Syst. Sci. Data 13(7) (2021) 3691–3705.
<https://doi.org/10.5194/essd-13-3691-2021>
- [43] S.E. Nicholson, A.H. Fink, C. Funk, *Assessing recovery and change in West Africa's rainfall regime from a 161-year record*, International Journal of Climatology 38(10) (2018) 3770–3786.
<https://doi.org/10.1002/joc.5530>
- [44] World Bank, Global Gas Flaring Tracker, Washington (2023).
<https://www.worldbank.org/en/topic/extractiveindustries/publication/2023-global-gas-flaring-tracker-report>
- [45] A. Van Hove, K. Aalstad, V. Lind, C. Arndt, V. Odongo, R. Ceriani, F. Fava, J. Hulth, N. Pirk, *Inferring methane emissions from African livestock by fusing drone, tower, and satellite data*, Biogeosciences 22(16) (2025) 4163–4186.
<https://doi.org/10.5194/bg-22-4163-2025>