

# **Pollution et Performance économique dans les pays d'Afrique subsaharienne : le rôle modérateur de la consommation d'énergie renouvelable**

## **Pollution and economic performance in sub-Saharan African countries: the moderating role of renewable energy consumption**

**Adama Faye**

Université Alioune Diop de Bambey  
UFR Santé et Développement Durable  
Département Développement Durable  
Sénégal  
**adama.faye2@uadb.edu.sn**

**Abdoulaye Ndiaye**

Laboratoire de recherche en économie de Saint-Louis  
(LARES-Université Gaston Berger de Saint-Sénégal)  
**layebaye2@yahoo.fr**

**Date de soumission** : 11/09/2023

**Date d'acceptation** : 08/11/2023

**Pour citer cet article** :

FAYE.A & NIDAYE.A (2023) « Pollution et Performance économique dans les pays d'Afrique subsaharienne : le rôle modérateur de la consommation d'énergie renouvelable », Revue Française d'Économie et de Gestion « Volume 4 : Numéro 11 » pp : 333 - 351.

Author(s) agree that this article remain permanently open access under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License



### **Résumé :**

Ce papier évalue la relation entre la pollution et le développement économique, en prenant en compte le rôle modérateur de la consommation d'énergie renouvelable sur un panel de 42 pays d'Afrique subsaharienne de 1990 à 2020. Les résultats obtenus à l'aide d'un modèle quadratique et d'un modèle de modération à effets fixes suggèrent que la performance économique favorise l'émission de Co<sub>2</sub>. Toutefois, l'impact de la performance économique est non linéaire sur l'émission de Co<sub>2</sub>, car il est plus modéré dans les pays caractérisés par un niveau de consommation d'énergie renouvelable élevé. La transition en énergie renouvelable est donc une solution pour garantir une économie plus propre en Afrique.

**Mots clés:** Emission CO<sub>2</sub> ; Courbe Kuznets environnementale ; Energie renouvelable ; modèle de modération ; Performance économique.

### **Abstract:**

This paper assesses the relationship between pollution and economic development by taking into account the moderating role of renewable energy consumption on a panel of 42 sub-Saharan African countries from 1990 to à 2020. The results obtained using a quadratic model and a fixed-effects moderation model suggest that economic performance favors Co<sub>2</sub> emissions. However, the impact of economic performance on Co<sub>2</sub> emissions is non-linear, as it is more moderate in countries with a high level of renewable energy consumption. The renewable energy transition is therefore a solution for ensuring a cleaner economy in Africa.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> emissions; Environmental Kuznets curve; Renewable energy; moderation model; Economic performance.

## Introduction.

Dans un contexte de développement des énergies renouvelables qui contraste avec le déclin des industries du charbon et du pétrole, la transition énergétique peut constituer l'une des solutions majeures pour contenir les problèmes liés aux changements climatiques. La transition énergétique désigne l'ensemble des transformations du système de production, de distribution et de consommation d'énergie effectuées sur un territoire dans le but de les rendre plus écologique. En d'autres termes, c'est le passage d'un système à énergies fossiles conventionnelles et non conventionnelles à un système à énergies renouvelables et propres. Aujourd'hui, la croissance fulgurante de la demande d'énergie au niveau mondiale dans un contexte de changements climatiques, devrait pousser les pays à diversifier leur consommation d'énergie en allant vers la transition énergétique, c'est-à-dire, une économie à faible intensité de carbone.

Les pays africains seront-ils capables de relever un tel défi ? Une chose est sûre, l'Afrique regorge des sources d'énergie renouvelable énormes. Les bassins hydrauliques d'Afrique centrale, la faille de la Rift Valley, ainsi que l'ensoleillement dont bénéficie le continent en général sont des sources d'énergies hydraulique, géothermique et solaire peu égalées dans le reste du monde. A l'heure actuelle, néanmoins, seule une infime partie de ce potentiel est exploité (OCDE) : 7% seulement des capacités hydrauliques, moins de 1% des capacités géothermiques, et les initiatives photovoltaïques restent encore embryonnaires.

Malgré l'existence d'un potentiel important d'énergies renouvelables compétitives, l'Afrique a une exploitation plus intensive aux énergies fossiles. Elle fournit environ 19% de la production mondiale de combustibles fossiles, tandis les populations africaines ne consomment que 3,2 % de l'énergie primaire mondiale, ce qui est la consommation par habitant la plus faible par continent (Cantoni et Musso, 2017). Bien que les sources d'énergie fossile, y compris le charbon, restent une part importante du mix énergétique de la plupart des pays, leur part dans le mix énergétique de l'Afrique est encore relativement modeste, soit 46% en 2020 (BAD, 2022). Sevrer les économies en bloquant l'accès aux systèmes énergétiques fossiles ferait avancer l'Afrique en accélérant sa transition énergétique. Cependant, cette transition implique des coûts d'investissement élevés et des délais plus longs. Selon le rapport 2022 sur les perspectives économiques en Afrique, publié par la Banque Africaine de développement, les énergies fossiles continueront d'être une source majeure du mix énergétique des pays africains jusqu'en 2050 et au-delà. Entre 1985 et 2020, l'Afrique a réduit la part du charbon dans son

mix énergétique de 54% à 26% (BAD, 2022). Le gaz naturel a servi de combustible de transition dans les pays qui y ont accès, leur permettant de réduire progressivement la part du charbon dans leur mix énergétique. Par exemple, d'après la même source, la part du gaz naturel dans le mix énergétique de l'Afrique a augmenté de 255% entre 1985 et 2020. Les autres sources du mix énergétique sont l'hydroélectricité et d'autres énergies renouvelables telles que les énergies éolienne, géothermique et solaire. L'Afrique a enregistré une augmentation de 500% des autres énergies renouvelables sur la période 1990-2020 et une baisse de 21% de l'hydroélectricité (BAD, 2022).

Aujourd'hui, la question de la transition énergétique se trouve au cœur de deux aspects fondamentaux de l'avenir de l'Afrique : le développement économique, social et politique, d'une part, et le changement climatique, d'autre part. Dès-lors les questions que nous nous posons sont : dans le contexte de changement climatique, la transition en énergie renouvelable peut-elle contribuer à la préservation de l'environnement tout en garantissant le développement économique en Afrique subsaharienne (ASS) ? Quel est l'impact de la performance économique sur la pollution en ASS ? Quel est l'impact de la transition énergétique sur la relation pollution-développement économique en ASS ?

Pour apporter des réponses à ces questions, cet article analyse le lien pollution-développement en Afrique subsaharienne, en tenant en compte du rôle modérateur de la consommation d'énergie renouvelable. La croissance économique, par le biais de la consommation d'énergie, est généralement considérée comme une principale cause de l'augmentation de l'émission de CO<sub>2</sub> (Bhattacharya et al., 2017). La littérature abordant le lien croissance économique et émission de CO<sub>2</sub> se décompose en deux groupes : les travaux qui soutiennent l'Hypothèse U inversé de Kuznets (Shafik et Bandyopadhyay, 1992 ; Grossman et Kruger, 1993 et 1995, Bilgili et al. 2016 ; Ben Jebli et al., 2016, etc.) et ceux qui la rejettent (Ben jebli et Ben Youssef, 2015 ; Zoundi, 2017 ; El Moummy et al., 2020 ; etc.). La plupart de ces travaux ignorent le rôle que pourrait jouer la transition en énergie renouvelable dans l'atteinte des objectifs de réduction de gaz à effet de serre. En Afrique subsaharienne, les rares travaux empiriques existants se sont limités à la mesure de la courbe Kuznets environnementale (CKE). Cet article prend en compte cette limite en examinant la CKE en rapport avec la transition énergétique sur un panel de 42 pays d'Afrique subsaharienne de 1990 à 2020.

L'intérêt de cet article se mesure à travers la prise en compte de la transition énergétique. Dans le débat économique, on défend souvent que la transition énergétique pourrait aider l'Afrique à

mettre fin à la pauvreté et à atteindre les Objectifs de développement durable des Nations unies à l'horizon 2030, et ceux fixés par l'Union africaine dans sa vision 2063. En effet, les sources d'énergie renouvelables peuvent jouer un rôle fondamental pour libérer le potentiel économique et humain de l'Afrique. Elles peuvent favoriser le développement individuel via l'amélioration des conditions éducatives et sanitaires. Elles peuvent permettre le développement de l'activité économique par la mécanisation et la modernisation des communications.

La méthodologie adoptée repose sur un panel à effets fixes en combinant une approche de modèle quadratique et celle d'un modèle de modération. D'une part, le modèle quadratique permet de tester l'hypothèse de la CKE en Afrique subsaharienne. D'autre part, le modèle de modération analyse la relation non linéaire entre la pollution et le développement selon les disparités des pays en matière de consommation d'énergie renouvelable.

La première contribution de cet article est la prise en compte de la transition énergétique, à travers la consommation d'énergie renouvelable, dans l'évaluation de la courbe Kuznets environnementale. La deuxième contribution est relative à la taille de l'échantillon qui porte sur un panel de 42 pays d'Afrique subsaharienne de 1990 à 2020. La plupart des études concernant l'Afrique portent sur un petit nombre de pays. La dernière contribution est liée à l'application d'un modèle de modération dans la relation pollution-développement dans un contexte africain. La littérature africaine utilise souvent une relation quadratique entre ces deux variables. La contribution de ce papier est de définir une relation non linéaire entre la pollution et le développement par rapport au niveau de consommation d'énergie renouvelable des pays de l'échantillon.

La suite de l'article s'organise comme suit. La section 1 résume la littérature empirique. Les données et la méthodologie sont exposées à la section 2, tandis que la section 3 présente les résultats. La dernière section est consacrée à la conclusion.

## **1. Revue de la littérature**

Au plan théorique, l'hypothèse de la Courbe Kuznets Environnementale<sup>1</sup> est issue des travaux de Grossman et Krueger (1991) mais formalisée pour la première fois dans l'article de Panayotou (1993). Cette hypothèse traduit que pendant les premières étapes du développement économique les agents se soucient peu de l'environnement. Lorsque le niveau de revenu permet

---

<sup>1</sup> La courbe de Kuznets (issue des travaux de Simon Kuznets sur le développement économique dans les années 1950) identifie une relation sous forme U inversé entre le niveau de développement d'un pays et les inégalités de revenu Jobert et Karanfil (2012).

de pourvoir les besoins primaires, on atteint un niveau seuil (le point de retournement – ou point d’inflexion –) où le souci pour l’environnement s’accroît et la tendance s’inverse. Au-delà de ce seuil, la croissance économique s’accompagne d’une amélioration des conditions environnementales et particulièrement d’une réduction de la pollution. Ainsi, la fonction de la pollution par rapport à la performance économique est en forme de U inversé. Depuis l’article fondateur de Grossman et Krueger (1991), la littérature s’est enrichie de très nombreuses études sur le sujet qui ont ensuite été synthétisées dans d’excellentes revues de la littérature comme celles de Kijima et al. (2010), de Jobert et Karanfil (2012) ou encore de Chen et al. (2019).

Les premiers travaux, tentant de vérifier la validité de la CKE, évaluaient l’impact de la croissance économique, représentée par le produit intérieur brut par habitant (PIB par habitant), sur les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Par la suite, d’autres variables ont été ajoutées au modèle de référence comme la densité de la population (Grossman et Kruger, 1995), l’ouverture commerciale (Jebli et al., 2016 ; Mahmood et al., 2019 ; El Moummy et al., 2020, etc.), l’urbanisation (Halkos et Tsionas, 2001), etc. Néanmoins, les études qui nous concernent ici sont celles qui ont analysé le rôle de la transition énergétique, représentée par la consommation d’énergie renouvelable, dans le cadre de l’hypothèse CKE.

Dans le cadre de la relation pollution-développement, les études ayant tenu en compte l’impact de la transition énergétique sont presque unanimes sur le potentiel des énergies renouvelables à réduire la pollution. Toutefois, les conclusions relatives à l’hypothèse de la courbe Kuznets environnementale sont marquées par des controverses. Certains travaux soutiennent l’Hypothèse CKE (Shafik et Bandyopadhyay, 1992 ; Grossman et Kruger, 1993 et 1995, Bilgili et al. 2016 ; etc.), tandis que d’autres la rejettent (Ben jebli et Ben Youssef, 2015 ; Zoundi, 2017 ; El Moummy et al., 2020 ; etc.).

Les travaux de Shafik et Bandyopadhyay (1992) et Grossman et Kruger (1993, 1995) sont considérés comme étant les études pionnières dans le domaine. A la suite de ces auteurs, beaucoup d’autres chercheurs sont attirés par la question. Pour donner quelques exemples, Bilgili et al. (2016) ont testé l’hypothèse CKE sur 17 pays de l’OCDE en utilisant les méthodes FMOLS et DOLS entre 1977 et 2010. Les auteurs voulaient en même temps montrer l’impact de la consommation d’énergie renouvelable sur les émissions de CO<sub>2</sub>. Leurs résultats donnent de preuve significative de l’existence d’une CKE dans les pays de l’OCDE et confirment le rôle des énergies renouvelables dans la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Dans le même cadre d’analyse, Ben Jebli et al. (2016) ont estimé une fonction quadratique utilisant le PIB, le

consommation d'énergie renouvelable et non renouvelable et le commerce extérieur. Sur un échantillon de 25 pays de l'OCDE, les auteurs ont effectué un test de causalité de Granger suivi d'une régression par les méthodes FMOLS et DOLS. Ils aboutissent à la validation de l'hypothèse CKE et affirment que la consommation d'énergie non renouvelable contribue à l'augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> tandis que la consommation d'énergie renouvelable et le commerce extérieur les réduisent. A partir d'une étude réalisée sur le groupe des BRICS, Dong et al. (2017) ont évalué le lien entre les émissions de CO<sub>2</sub> par habitant, le PIB et la consommation de gaz naturel et d'énergie renouvelable dans le cadre de la courbe de Kuznets environnementale sur la période 1985-2016. Ils concluent en faveur de l'hypothèse CKE et montrent que l'augmentation de la consommation de gaz naturel et d'énergie renouvelable réduit les émissions de CO<sub>2</sub> dans les cinq pays des BRICS.

Si ces études reposent sur des données de panel, un deuxième champ de recherche privilégie la méthode d'analyse des séries temporelles. Par exemple, Bölük et Mehmet (2015) ont testé la validité de l'hypothèse CKE et étudié en même temps le potentiel des énergies renouvelables dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre en Turquie. A l'aide d'un modèle autorégressif échelonné (ARDL) sur la période 1961-2010, les auteurs ont étudié le lien entre les émissions de CO<sub>2</sub>, le PIB et la production d'électricité renouvelable. Ils aboutissent à deux conclusions majeures. D'une part, la production d'électricité renouvelable contribue à l'amélioration de l'environnement avec un décalage d'un an, et d'autre part, la confirmation de l'hypothèse CKE en Turquie. Selon les auteurs, à partir d'un seuil, appelé un pic de PIB/habitant qui est de 9920 US Dollar, les émissions de CO<sub>2</sub> commencent à baisser. Ces résultats confortent les travaux de Sugiawan et Managi (2016), qui ont constaté l'existence de CKE en Indonésie tout en confirmant les bénéfices des énergies renouvelables dans la protection de l'environnement par la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Sinha et Shahabz (2018) aboutissent à des conclusions similaires en ayant recours à des régressions de type ARDL sur données indiennes de 1971 à 2015. Des résultats semblables sont obtenus par d'autres études notamment Dong et al. (2018) et Chen et al. (2019) en chine, Mahmood et al. (2019) au Pakistan, etc.

Un autre pan de la littérature rejette l'hypothèse CKE tout en validant le rôle de la transition énergétique dans la protection de l'environnement. Par exemple, pour ne citer que quelques études récentes, Chen et al. (2019) ne trouvent pas une preuve significative de l'existence de CKE sur un panel de 30 provinces chinoises de 1995 à 2012. L'auteur reconnaît toutefois l'effet positif de la consommation d'énergie renouvelable dans la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. De

son côté, Zoundi (2017) a analysé la même relation sur 25 pays africains de 1980 à 2012. Les résultats de l'étude rejettent l'hypothèse CKE mais consolident l'idée selon laquelle la consommation d'énergie renouvelable réduit les émissions de CO<sub>2</sub>. Ben jebli et Ben Youssef (2015), en utilisant des données tunisiennes et une approche ARDL, ne trouvent pas une preuve significative de l'existence de CKE, mais confirment la capacité des énergies renouvelables à réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. El Moummy et al. (2020) aboutissent à des résultats similaires sur données marocaines entre 1990 et 2017. D'autres études rejettent aussi l'hypothèse CKE mais ne prennent pas en compte le rôle des énergies renouvelables (Shahbaz et al., 2014 ; Abdallah et Abugamos, 2017 ; Özokcu et Özdemir, 2017, etc.).

En Afrique subsaharienne, on note presque une quasi absence d'études analysant l'impact des énergies renouvelables sur la relation pollution-développement. La plupart des études existantes s'intéressent uniquement à l'hypothèse CKE et ressortent souvent à la rejeter (voir Jobert et Karanfil (2012) ainsi que Grosset 2 et Nguyen-Van 3 (2016), pour un survol de littérature).

Malgré leur intérêt, cette littérature analysant la transition énergétique, dans le cadre de l'hypothèse CKE, s'est limitée dans le meilleur des cas à la régression d'une relation quadratique entre l'émission de CO<sub>2</sub> et le PIB par habitant en intégrant la consommation d'énergie renouvelable. Donc elle s'intéressait en réalité à l'impact direct (effet marginal) de la transition en énergie renouvelable sur les émissions de CO<sub>2</sub>. Une meilleure approche serait de voir comment la transition énergétique, à travers la consommation d'énergie renouvelable, pourrait affecter le lien pollution-développement, c'est-à-dire le rôle modérateur qu'elle pourrait jouer sur cette relation. Sous cet angle, la littérature sur la question ne fournit aucune information. Alors il serait intéressant pour les pays d'Afrique subsaharienne de savoir si la transition en énergie renouvelable pourrait affecter l'environnement mais aussi la relation pollution-développement. Cette présente étude s'attèle, *via* une approche appropriée (effet indirect), à évaluer l'impact de la transition énergétique sur la relation pollution-développement économique dans les pays d'Afrique subsaharienne. Cela va constituer une première dans la littérature économique africaine.

## **2. Données et Méthodologie**

### **2.1. Données et statistiques descriptives**

Cette étude couvre un panel de 42 pays d'Afrique subsaharienne, sélectionnés en fonction de la disponibilité des données, sur la période 1990-2020. Les données sont collectées à partir de

World development Indicators (*World Bank, 2021*). Le tableau 1 présente la liste des variables ainsi que leur définition.

La transition en énergie renouvelable (TE) est notre principale variable explicative. A l'instar de la littérature, elle est mesurée par la consommation d'énergie renouvelable (en % du total énergie consommée). La performance économique (PE) est également une variable exogène d'intérêt. La consommation d'énergie renouvelable est utilisée comme une variable de modération dans la relation entre la PE et l'émission de Co<sub>2</sub>.

**Tableau 1 : Définition des variables**

<b>Variables</b>	<b>Définition de la variable</b>
<i>CO2</i>	<i>Emission de dioxyde de carbone en tonnes métriques par habitant</i>
<i>TE</i>	<i>Consommation d'énergie renouvelable en % du total énergie consommée</i>
<i>PE</i>	<i>Produit Intérieur Brut (PIB) par habitant exprimé en dollar constant de 2015.</i>
<i>Variables de contrôle</i>	
<i>NREC</i>	<i>Consommation d'énergie non renouvelable en % du total énergie consommée</i>
<i>DENSITY</i>	<i>Densité de la population (personnes par kilomètre carré de superficie des terres)</i>
<i>FOREST</i>	<i>Surface forestière (% du territoire)</i>

Les statistiques descriptives du tableau 2 présentent les caractéristiques des variables utilisées dans notre étude. Sur l'échantillon étudié, le niveau moyen de consommation d'énergie renouvelable dépasse 60% du total énergie consommée, soit 68,17%. L'ampleur de la consommation d'énergie renouvelable suggère que la transition en énergie renouvelable peut avoir un impact sur l'environnement, en réduisant l'émission de Co<sub>2</sub>.

De façon globale, les pays d'Afrique subsaharienne ont enregistré une évolution à la baisse des émissions de gaz à effet de serre, au cours de la dernière décennie. Par exemple, l'émission de Co<sub>2</sub> par habitant est passée de 1,08 tonnes métriques en 2010 à 1,01 tonne en 2020. Sur la même période, la consommation d'énergie renouvelable a aussi diminué, passant de 65,3% à 61,1% du totale énergie consommée. L'évolution la plus remarquable a été réalisée au niveau de la performance économique, où la valeur du PIB par habitant est passée de 2312,2 dollars en 2010 à 2320,4 dollars en 2020. Cette dynamique cache toutefois de fortes disparités entre les pays. Les autres variables de contrôle sont aussi caractérisées par de fortes variabilités. Par exemple, la consommation d'énergie non renouvelable varie entre 0 et 88,15%, avec une valeur moyenne de 28,74%.

**Tableau 2 : Statistiques descriptives**

Variables	Obs	Mean	Std. Dev.	Min	Max
<i>Variables en niveau</i>					
<i>CO2</i>	1257	0,92	1.72	0	11,94
<i>PE</i>	1320	2045,96	2719.39	204,02	16989,96
<i>TE</i>	1259	68,17	25.51	0,71	98,34
<i>NREC</i>	585	28,74	23.86	0	88,15
<i>DENSITY</i>	1302	89,65	120,18	1,66	623,52
<i>FOREST</i>	1300	33,87	24,15	0,30	96,23

## 2.2. Approche méthodologique

L'analyse de la relation entre la Performance économique et l'émission de  $CO_2$  est basée sur un modèle de régression en panel, prenant en compte l'hétérogénéité individuelle, dont la forme générale se présente comme suit :

$$CO2_{it} = \alpha_{0i} + \alpha_1 PE_{it} + \alpha_2 TE_{it} + \alpha_3 NREC_{it} + \alpha_4 DENSITY_{it} + \alpha_5 FOREST_{it} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

où le paramètre  $\alpha_{0i}$  définit les effets fixes individuels,  $\varepsilon_{it}$  le terme d'erreur et la description des autres variables est présentée dans le tableau 1. L'équation (1) est estimée à l'aide des modèles à effets fixes ou aléatoires. Le test de Hausman permet de choisir le meilleur entre ces deux modèles.

A l'instar de la littérature (Kijima et al., 2010 ; Jobert et Karanfil, 2012 ; Chen et al., 2019, etc.), la relation pollution et développement est souvent présentée comme non linéaire. Cette relation formalisée sous le nom de l'hypothèse de la Courbe Kuznets Environnementale (CKE), traduit le fait que durant les premières étapes du développement économique, les pays se soucient peu de l'environnement. Lorsque le niveau de revenu permet de pourvoir les besoins primaires, on atteint un niveau seuil (le point de retournement) où le souci pour l'environnement s'accroît et la tendance s'inverse. Au-delà de ce seuil, la croissance économique s'accompagne d'une amélioration des conditions environnementales et particulièrement d'une réduction de la pollution. Dans le but de vérifier cette hypothèse, nous réécrivons l'équation (Eq. 1) sous forme quadratique pour obtenir le modèle suivant :

$$CO2_{it} = \alpha_{0i} + \alpha_1 PE_{it} + \alpha_2 PE^2_{it} + \alpha_3 TE_{it} + \alpha_4 NREC_{it} + \alpha_5 DENSITY_{it} + \alpha_6 FOREST_{it} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

Un certain consensus a émergé dans la littérature, concernant l'impact non linéaire du développement économique et de la consommation énergétique sur l'environnement<sup>2</sup>. L'impact de la PE sur l'émission de CO<sub>2</sub> est susceptible d'être non linéaire en raison aussi de la disparité du niveau de consommation d'énergie renouvelable des pays. En effet, durant les premières étapes de développement, les pays se soucient peu de l'environnement et optent pour système de production intensif en énergie fossile. Toutefois, lorsqu'ils atteignent un niveau seuil de revenu permettant de pourvoir leurs besoins primaires, ils commencent à se soucier de l'environnement en optant pour un système de production intensif en énergie renouvelable. Ainsi, au-delà d'un seuil donné, la croissance économique s'accompagne d'une augmentation de la consommation d'énergie renouvelable pour entraîner une réduction de la pollution. Dans le but d'évaluer l'effet du niveau de transition en énergie renouvelable sur la relation entre la PE et la pollution, nous introduisons une variable d'interaction entre la TE et l'indicateur de performance économique dans l'équation (Eq. 1) pour obtenir le modèle de modération suivant :

$$CO2_{it} = \alpha_{0i} + \alpha_1 PE_{it} + \alpha_2 TE_{it} + \delta TE_{it} \# PE_{it} + \alpha_3 NREC_{it} + \alpha_4 DENSITY_{it} + \alpha_4 FOREST_{it} + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

L'équation (Eq. 3) a l'avantage de capter la relation entre la PE et la pollution en fonction du niveau de consommation d'énergie renouvelable.  $TE_{it} \# PE_{it}$  représente la variable d'interaction entre la consommation d'énergie renouvelable et la performance économique. Le coefficient  $\delta$  est notre paramètre d'intérêt qui représente la dérivée croisée de  $CO2_{it}$  par rapport à la fois TE et PE  $\left(\frac{\partial^2 CO2}{\partial TE \partial PE}\right)$ , tandis que le coefficient  $\alpha_1$  mesure l'impact direct de la PE sur le  $CO2 \left(\frac{\partial CO2}{\partial PE} \Big|_{PE=0}\right)$ . Notre principale hypothèse est que  $\delta \neq 0$ , ce qui indique que la relation entre la performance économique et la pollution est significativement différente lorsque le niveau de consommation d'énergie renouvelable est pris en compte. Par exemple, un coefficient significatif et négatif signifierait que la PE et l'émission de CO<sub>2</sub> sont négativement liées au niveau de consommation d'énergie renouvelable. Ainsi, l'effet total de la PE sur l'émission de CO<sub>2</sub> varie avec le niveau de consommation d'énergie renouvelable et est donné par  $\alpha_1 + \delta TE$  et la variance de l'effet total correspond à  $Var(\alpha_1) + TE^2 \times Var(\delta) + 2TE \times Cov(\alpha_1, \delta)$ . Nous estimons chaque modèle par la méthode des moindres carrés ordinaires avec des erreurs types robustes à l'hétéroscédasticité.

<sup>2</sup> Voir Grossman et Krueger (1991), Kijima et al. (2010) et Jobert et Karanfil (2012).

### 3. Résultats empiriques

Dans cette section, nous analysons, d'une part, les résultats de l'estimation de la relation quadratique entre la PE et l'émission de  $CO_2$ , et d'autre part, nous vérifions la robustesse des résultats par un modèle de modération captant le rôle modérateur de la consommation d'énergie renouvelable sur le lien PE-Pollution.

#### 3.1. Résultats de base

Les résultats de l'estimation sont consignés dans le tableau 3. Dans la colonne 1, nous utilisons la relation quadratique avec la consommation d'énergie renouvelable sans les variables de contrôle. Les coefficients estimés de TE et de  $TE^2$  sont significatifs et de signes opposés mettant en évidence une relation U inversée de Kuznets. La consommation d'énergie renouvelable ressort négative mais non significative. Toutefois, le  $R^2$  (c'est-à-dire le coefficient de détermination de l'ajustement) est relativement faible (28,2%). De la colonne 2 à 4, nous introduisons en plus de la relation quadratique, les autres variables. Nous constatons que TE et de  $TE^2$  conservent les mêmes signes opposés d'une colonne à l'autre. De surcroît, le modèle s'améliore au fur et à mesure d'ajouter les autres variables de contrôle (28,2% à 74,8%). En considérant la colonne 4, nos résultats confirment une courbe Kuznets environnementale dans les pays en développement, et confortent les travaux obtenus par Bilgili et al. (2016) et Ben Jebli et al. (2016) sur les pays de l'OCDE et par Dong et al. (2017) sur les BRICS. Ce résultat pourrait être interprété économiquement par le fait que les pays à faible performance économique négligent souvent les questions environnementales pour se concentrer sur leurs besoins primaires. Une fois arrivé à un certain niveau de développement économique, ils commencent alors à prendre des mesures orientées vers l'amélioration des conditions environnementales.

L'un des coefficients d'intérêt dans nos régressions (Tableau 3), est celui de la consommation d'énergie renouvelable. Le coefficient de cette variable est négatif et significatif montrant l'effet positif de la consommation d'énergie renouvelable dans la réduction des émissions de  $CO_2$ . Par exemple, une hausse de 1% de la part de consommation d'énergie renouvelable sur le total énergie consommée va entraîner une baisse de 0,745% de l'émission de  $CO_2$  par habitant. Ce résultat conforte ceux obtenus par Zoundi (2017) et Chen et al. (2019) sur des échantillons respectifs de 25 pays africains et de 30 provinces chinoises.

Nos résultats mettent aussi en évidence que la consommation d'énergie non renouvelable exerce un effet positif et significatif sur l'émission de  $CO_2$ . Ce résultat est confirmé par Chen et al.

(2019) qui montrent, à partir d'un échantillon de 30 provinces chinoises, que la consommation d'énergie fossile est nuisible sur l'environnement. Enfin, la surface forestière (en % du territoire) participe à l'amélioration des conditions environnementales. En effet, l'augmentation des espaces forestières permet aux plantes d'absorber les émissions de  $\text{CO}_2$  grâce au processus de la photosynthèse<sup>3</sup>. Ainsi, les grandes surfaces boisées constituent des puits de carbone qui stockent le dioxyde de carbone et rafraîchissent l'air.

**Tableau 3:** Résultats du panel à effets fixes de la relation quadratique entre la Performance économique et l'émission de  $\text{CO}_2$ .

VARIABLES	(1) CO2	(2) CO2	(3) CO2	(4) CO2
PE	3,718** (1,422)	2,190** (0,899)	2,006* (0,993)	2,001** (0,826)
PE <sup>2</sup>	-0,477** (0,223)	-0,363** (0,163)	-0,341* (0,174)	-0,338** (0,147)
TE	-0,496 (0,335)	-0,818*** (0,202)	-0,779*** (0,206)	-0,745*** (0,186)
NREC	-	0,561*** (0,115)	0,559*** (0,110)	0,535*** (0,101)
Density	-	-	0,132 (0,153)	-0,115 (0,162)
Forest	-	-	-	-1,047*** (0,325)
Constant	-6,468*** (2,076)	-2,857** (1,048)	-2,761** (1,075)	-0,874 (1,066)
Observations	1,302	547	547	547
R <sup>2</sup> within	0,282	0,714	0,719	0,748
Nombre de pays	42	22	22	22
F-Fisher	29,46***	47,63***	35,84***	41,93***
Test de Hausman ( <i>Khi</i> <sup>2</sup> )	29,01***	91,75***	228,39***	106,01***

Notes : Les écarts types entre parenthèses, \*\*\*  $p < 0,01$ , \*\*  $p < 0,05$ , \*  $p < 0,1$ . Toutes les variables exogènes sont en logarithme népérien.

Comme mentionné ci-dessous, les pays ayant le même niveau de performance économique peuvent avoir des degrés de pollution différents, en raison du niveau de consommation d'énergie renouvelable. A cet égard, la sous-section qui suit évalue les effets marginaux de la performance économique sur l'émission de  $\text{CO}_2$  en tenant compte du niveau de consommation d'énergie renouvelable, et en conséquence propose une analyse de robustesse des résultats précédents.

<sup>3</sup> Processus par lequel les plantes vertes synthétisent des matières organiques grâce à l'énergie lumineuse, en absorbant le gaz carbonique de l'air et en rejetant l'oxygène.

### 3.2. Analyse de robustesse à partir d'un modèle de modération

Les résultats de l'estimation sont présentés dans le tableau 4. Dans la colonne 1, nous utilisons la consommation d'énergie renouvelable (TE) et la PE sans la variable d'interaction et les variables de contrôle. Le coefficient estimé de la TE est significatif et négatif, tandis que le coefficient associé à la variable PE est positif et significatif au seuil de 1%. Néanmoins, le  $R^2$  est relativement faible (31,3%). Dans la colonne 2, nous effectuons la même régression mais en ajoutant le terme d'interaction sans les variables de contrôle. La consommation d'énergie renouvelable devient positive et significative, la variable d'interaction est négative et significative au seuil de 1%, mais le pouvoir explicatif du modèle reste toujours relativement faible ( $R^2=37,3\%$ ). De la colonne 3 à 5, nous introduisons une interaction entre TE et PE et aussi les autres variables. D'une part, nous remarquons que les coefficients estimés de PE et le terme d'interaction sont robustes et significatifs d'une colonne à l'autre. D'autre part, le modèle s'améliore en termes de valeur  $R^2$  au fur et à mesure que nous ajoutons les variables de contrôle (31,3% à 74,1%). Pour l'interprétation, nous utilisons la colonne 10 en raison de sa performance. Les résultats suggèrent que le coefficient estimé de la performance économique est positif et significatif au seuil de 1%. Par exemple, une hausse de 1% du PIB par habitant va entraîner un accroissement de l'émission de  $CO_2$  de 0,055%. Il existe donc une relation positive entre la performance économique et la pollution pour les pays où il n'y a pas d'hétérogénéité de consommation d'énergie renouvelable. Ce résultat confirme l'effet marginal de la performance économique trouvé dans nos précédentes estimations.

Il est intéressant de noter que le coefficient estimé du terme d'interaction entre la consommation d'énergie renouvelable et la PE est négatif et significatif au niveau de 1%. Ce résultat révèle que même si la performance économique a un effet positif sur la pollution, le niveau de consommation d'énergie renouvelable des pays peut inhiber l'effet. Plus précisément, les pays qui ont un niveau de consommation d'énergie renouvelable élevé ont plus de chance de voir leurs conditions environnementales être améliorées par la performance économique et *vice versa*.

En ce qui concerne les variables de contrôle, nos résultats montrent que la consommation d'énergie non renouvelable ainsi que la densité de la population exercent un effet positif et significatif sur l'émission de  $CO_2$ . En revanche, la surface forestière a un impact négatif significatif sur la pollution. Ces résultats corroborent ceux obtenus au paragraphe précédent, à partir des estimations du modèle quadratique.

**Tableau 4 :** Relation non linéaire entre la consommation d'énergie renouvelable et la pollution : Résultats du modèle à effets fixes.

VARIABLES	(1) CO2	(2) CO2	(3) CO2	(4) CO2	(5) CO2
TE	-0,026*** (0,002)	0,154*** (0,009)	0,106*** (0,017)	0,0756*** (0,018)	0,0750*** (0,018)
PE	0,018*** (0,001)	0,104*** (0,005)	0,067*** (0,008)	0,056*** (0,008)	0,055*** (0,008)
TE#PE	-	-0,045*** (0,002)	-0,035*** (0,004)	-0,028*** (0,004)	-0,027*** (0,004)
NREC	-	-	0,005*** (0,001)	0,004*** (0,001)	0,003*** (0,001)
Density	-	-	-	0,007*** (0,001)	0,010*** (0,002)
Forest	-	-	-	-	-0,013*** (0,004)
Constant	-	-0,345*** (0,018)	-0,200*** (0,033)	-0,141*** (0,035)	-0,117*** (0,036)
Observations	1256	1256	547	547	547
R <sup>2</sup> within	0,313	0,373	0,71	0,712	0,742
Nombre de pays	42	42	22	22	22
F-Fisher	276,2***	239,9***	319,6***	257,6***	248,9***
Test de Hausman (Khi 2)	29,79***	26,90***	33,88***	53,67***	56,37***

*Notes : Les écarts types entre parenthèses, \*\*\* p<0,01, \*\* p<0,05, \* p<0,1. Toutes les variables exogènes sont en logarithme népérien.*

## Conclusion

L'objectif de ce papier était d'évaluer la relation entre la pollution et le développement économique, en prenant en compte le rôle modérateur de la consommation d'énergie renouvelable sur un panel de 42 pays d'Afrique subsaharienne de 1990 à 2020. Notre méthodologie reposait sur un panel à effets fixes en combinant une approche de modèle quadratique et celle d'un modèle de modération. D'une part, le modèle quadratique nous a permis de tester l'hypothèse de la courbe Kuznets environnementale dans les pays d'Afrique subsaharienne. D'autre part, le modèle de modération nous a permis d'analyser la relation non linéaire entre la pollution et le développement mais selon les disparités des pays en matière de consommation d'énergie renouvelable.

Dans le modèle quadratique, les résultats obtenus mettent en évidence une relation en forme de U inversé (CKE) entre la pollution et le développement économique dans les pays en développement. La consommation d'énergie renouvelable améliore également les conditions environnementales en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. Dans le modèle de modération, la performance économique augmente les émissions de CO<sub>2</sub>. Toutefois, la relation

entre la pollution et le développement économique est non linéaire par rapport à la consommation d'énergie renouvelable. En effet, les pays qui ont un niveau de consommation d'énergie renouvelable élevé ont plus de chance de voir leurs conditions environnementales être améliorées par la performance économique et *vice versa*. En conséquence, les politiques de la transition en énergie renouvelable méritent d'être appuyées en Afrique subsaharienne pour garantir une croissance économique plus propre.

Cette étude offre certaines implications de politiques économiques. D'abord, elle pourrait permettre aux autorités gouvernementales africaines d'accélérer leur processus de transition énergétique afin d'atteindre l'accès à l'énergie pour tous. Ensuite, cet article pourrait participer à la diminution des dégâts causés à l'environnement par le biais de la consommation d'énergies renouvelables, ce qui nous permettra de vivre dans un environnement sain, propre et vivable. Enfin, elle peut contribuer à la prise de décision et à l'élaboration de politique sectoriel. En termes de perspective, cette étude pourrait être étendue à l'ensemble des pays africains et à des pays développés afin de faire une étude comparative.

Comme tout travail scientifique, cette étude admet un certain nombre de limites qui peuvent être classées en deux types. Premièrement, l'absence de quelques données et indicateurs dont leur présence dans cette étude aurait dû apporter certainement plus d'informations utiles et un résultat meilleur pour la population subsaharienne. Deuxièmement, l'étendue ou la taille de l'échantillon pourraient être beaucoup plus longue, ce qui offrirait un meilleur résultat et plus d'implications de politiques économiques.

### **Bibliographie :**

#### **Article de revue :**

**Abdallh, A. A., & Abugamos, H.** (2017). A semi-parametric panel data analysis on the urbanisation-carbon emissions nexus for the MENA countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1350-1356.

**BAD** (2022), Rapport sur les perspectives économiques en Afrique, ISBN 978-0-9635254-3-7.

**Ben Jebli, M., et Slim Ben Y.** (2015). The Environmental Kuznets Curve, Economic Growth, Renewable and Non-Renewable Energy, and Trade in Tunisia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 173-85.

- Ben Jebli, M.**, Slim Ben, Y, et Ozturk, I (2016). Testing Environmental Kuznets Curve Hypothesis: The Role of Renewable and Non-Renewable Energy Consumption and Trade in OECD Countries. *Ecological Indicators*, 60, 824-31.
- Bilgili, F.**, Emrah K., et Ümit B. (2016). The Dynamic Impact of Renewable Energy Consumption on CO<sub>2</sub> Emissions: A Revisited Environmental Kuznets Curve Approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 838-45.
- Bölük, G.**, et Mehmet M. (2015). The Renewable Energy, Growth and Environmental Kuznets Curve in Turkey: An ARDL Approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52.
- Bjork, G.C.**, (1999). The Way It Worked and Why It Won't: Structural Change and the Slowdown of US Economic Growth. *Greenwood Publishing Group*.
- Bradford, D.F.**, Fender, R.A., Shore, S.H., Wagner, M., 2005. The Environmental Kuznets Curve: Exploring a Fresh Specification, *Contributions to Economic Analysis & Policy*, Vol. 4, No.1.
- Chen Y., Z. Wang, Z. Zhong** (2019). CO<sub>2</sub> emissions, economic growth, renewable and non-renewable energy production and foreign trade in China, *Renewable Energy*, Volume 131, 2019, pp. 208-216, ISSN 0960-1481.
- Chen, Y.**, Zhao, J., Lai, Z., Wang, Z., & Xia, H. (2019). Exploring the effects of economic growth, and renewable and non-renewable energy consumption on China's CO<sub>2</sub> emissions: Evidence from a regional panel analysis. *Renewable Energy*, 140, 341-353.
- Dong, K.**, Renjin S., Hongdian J., et Xiangang Z. (2018). CO<sub>2</sub> Emissions, Economic Growth, and the Environmental Kuznets Curve in China: What Roles Can Nuclear Energy and Renewable Energy Play? *Journal of Cleaner Production*, 196.
- Dong, K.**, Sun, R., & Hochman, G. (2017). Do natural gas and renewable energy consumption lead to less CO<sub>2</sub> emission? Empirical evidence from a panel of BRICS countries. *Energy*, 141, 1466-1478.
- Eggoh J. C.**, Bangake C., Rault C. (2011) Energy consumption and economic growth revisited in African countries, *Energy Policy*, 39, 7408-7421

- El Mummy. C.**, Baddih Hindou et Salmi Yahya, (2020). « Energies renouvelables, croissance économique et ouverture commerciale : Une analyse empirique de la courbe environnementale de Kuznets au Maroc », ISSN: 2658-8455 Volume 1, pp. 402-421. [www.ijafame.org](http://www.ijafame.org).
- Grosset 2, F.**, & Nguyen-Van 3, P. (2016). Consommation d'énergie et croissance économique en Afrique subsaharienne 1. *Mondes en développement*, (4), 25-42.
- Grossman, G. M.**, et Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *The quarterly journal of economics*, 110(2), 353-377.
- Grossman G.M.** et Krueger A.B. (1993). Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement. In "The Mexico-U.S. free trade agreement", P. Garber, ed. Cambridge, Mass.: MIT Press.; pp.13-56.
- Grossmann, G. M.**, Krueger, A. B., 1991, Environmental impacts of a North American free trade agreement, *NBER Working paper*, 3914.
- Halkos, G. E.**, Tsionas, E. G. 2001, Environmental Kuznets curves: Bayesian evidence from switching regime models, *Energy Economics*, 23, 191-210.
- Jobert T.**, Karanfil F., (2012), « Formation et déformation de la Courbe de Kuznets Environnementale pour les émissions de CO2 », *Innovations*, 2012/1 (n°37), p. 11-26.
- Kijima, M.**, Nishide, K., Ohyama, A., 2010, Economic models for the environmental Kuznets curve: A survey, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 34, 1187-1201.
- Leitão, A.** (2010). Corruption and the environmental Kuznets Curve: Empirical evidence for sulfur, *Ecological Economics* 69 (2010), 2191-2201.
- Mahmood, N.**, Zhaohua W., and Syed T. (2019). Renewable Energy, Economic Growth, Human Capital, and CO2 Emission: An Empirical Analysis. *Environmental Science and Pollution Research* 26, no 20, 20619-30.
- Mankiw, N.G.**, (2012). Principles of Macroeconomics. South-western Cengage Learning.
- Mensah J. T.** (2014). Carbon emissions, energy consumption and output: A threshold analysis on the causal dynamics in emerging African economies, *Energy Policy*, 70, 172-182

- Nelson, C.R.**, Plosser, C.I., 1982. Trends and random walks in macroeconomic time series. *Journal of Monetary Economics* 10, 139-162.
- Özokcu, S.**, & Özdemir, Ö. (2017). Economic growth, energy, and environmental Kuznets curve. *Renewable and sustainable energy reviews*, 72, 639-647.
- Panayotou, T.**, (1993). Empirical Tests and Policy Analysis of Environmental Degradation at Different Stages of Economic Development, *Working Paper WP238*, Technology and Employment Program, International Labour Office, Geneva.
- Shafik, N.**, & Bandyopadhyay, S. (1992). Economic growth and environmental quality: time series and cross section evidence. *Policy research working paper N° WPS904*, World Bank.
- Shahbaz M., N.** Khraief, G. Salah Uddin, I. Ozturk (2014). Environmental Kuznets curve in an open economy: A bounds testing and causality analysis for Tunisia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 34, 2014, pp. 325-336, ISSN 1364-0321.
- Sinha, A.**, et Shahbaz, M. (2018). Estimation of Environmental Kuznets Curve for CO2 Emission: Role of Renewable Energy Generation in India. *Renewable Energy*, 119.
- Sugiawan, Y.**, & Managi, S. (2016). The environmental Kuznets curve in Indonesia: Exploring the potential of renewable energy. *Energy Policy*, 98, 187-198.
- Zoundi, Z.** (2017). CO2 Emissions, Renewable Energy and the Environmental Kuznets Curve, a Panel Cointegration Approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72.