

Dossier Econométrie des données de panel  
MASTER 2 ECAP

**Analyse empirique de la validité de la courbe environnementale de  
Kuznets sur 146 pays entre 2000 et 2020**

Dossier réalisé par :

Emma LABRE-BLANC & Valorys TRILLAUD

Année universitaire 2024-2025

## Résumé

Cette étude examine la relation entre le développement économique et les émissions de CO<sub>2</sub> dans 146 pays sur la période 2000-2020, en s'appuyant sur la courbe environnementale de Kuznets (CEK). À l'aide d'un modèle à effets fixes validé par le test de Hausman, les résultats confirment une relation en « U » inversé entre le PIB par habitant et les émissions de CO<sub>2</sub>, avec un point de retournement situé à un PIB par habitant de 34 544 \$ (PPA). Les variables de contrôle, telles que l'urbanisation et la consommation d'énergie, ont un impact positif et significatif sur les émissions, soulignant le rôle des structures économiques et énergétiques. En revanche, l'ouverture commerciale n'a pas d'effet significatif direct. Les spécificités nationales, capturées par les effets fixes, montrent des différences importantes entre pays, reflétant des structures institutionnelles et économiques uniques. Ces résultats renforcent l'importance de politiques adaptées pour atteindre un développement durable.

**Mots clés :** CEK - Données de panel - Stata

## Abstract

This study examines the relationship between economic development and CO<sub>2</sub> emissions in 146 countries over the period 2000-2020, using the Kuznets Environmental Curve (KEC). Using a fixed-effects model validated by the Hausman test, the results confirm an inverted U-shaped relationship between GDP per capita and CO<sub>2</sub> emissions, with a turning point located at a GDP per capita of \$34,544 (PPP). Control variables such as urbanisation and energy consumption have a positive and significant impact on emissions, highlighting the role of economic and energy structures. On the other hand, trade openness has no direct significant effect. National specificities, captured by fixed effects, show significant differences between countries, reflecting unique institutional and economic structures. These results reinforce the importance of appropriate policies to achieve sustainable development.

**Keywords :** KEC - Panel data - Stata

## Sommaire

Introduction.....	4
I. Revue de littérature.....	5
II. Description des données.....	7
III. Présentation des spécifications économétriques estimées.....	11
IV. Présentation des estimations et discussion des résultats.....	12
Bibliographie.....	19
Annexes.....	20
Table des matières.....	22

## Introduction

La préservation de l'environnement est aujourd'hui l'un des défis majeurs auxquels l'humanité est confrontée. Alors que les impacts du changement climatique deviennent de plus en plus visibles : hausse des températures, phénomènes météorologiques extrêmes, perte de biodiversité, les sociétés et les gouvernements se trouvent dans l'obligation d'équilibrer leurs objectifs de développement économique avec les impératifs environnementaux. Ce dilemme illustre la nécessité d'une réflexion approfondie sur la relation entre croissance économique et dégradation environnementale.

Dans ce cadre, la courbe environnementale de Kuznets (Environmental Kuznets Curve, EKC) propose une hypothèse selon laquelle la relation entre la pollution et le niveau de richesse économique d'un pays suit une courbe en forme de "U inversé". En d'autres termes, dans les phases initiales de développement, la pollution tend à augmenter avec la croissance économique, mais au-delà d'un certain seuil de revenu, elle diminue à mesure que les économies se tournent vers des technologies plus propres et des structures économiques moins intensives en carbone. Ce modèle théorique met en lumière des mécanismes économiques (industrialisation, innovations technologiques, demande sociale accrue de durabilité) et institutionnels (réglementations environnementales, gouvernance) qui influencent cette dynamique.

Le contexte actuel, marqué par des engagements internationaux tels que l'Accord de Paris (2015) et des politiques nationales visant à atteindre des objectifs nets zéro, rend cette problématique particulièrement pertinente. Les trajectoires économiques des pays développés, émergents et en développement soulèvent des interrogations quant à la validité de la courbe EKC dans des environnements économiques et institutionnels diversifiés. Cependant, la validité empirique de cette hypothèse reste débattue, notamment dans un contexte où les disparités entre pays persistent et où les enjeux environnementaux s'intensifient.

La question centrale est alors : Quelle est la validité empirique de la courbe environnementale de Kuznets dans un cadre multi-pays sur la période contemporaine 2000-2020 ?

L'intérêt de cette problématique est double. D'un point de vue théorique, elle approfondit notre compréhension des interactions entre croissance et environnement, en s'appuyant sur des données récentes et des modèles économétriques robustes. D'un point de vue managérial, elle offre des perspectives concrètes pour guider les décideurs publics et privés dans la mise en place de politiques visant à réduire les émissions tout en favorisant la croissance économique.

Pour répondre à cette problématique, notre étude mobilise des données de panel couvrant 20 années et un ensemble de 146 pays représentatifs des trois grandes catégories économiques : pays développés, émergents et en développement. Nous analysons la relation entre le PIB par habitant et les émissions de CO<sub>2</sub> par habitant, tout en intégrant des variables de contrôle pertinentes (urbanisation, intensité énergétique, ouverture commerciale).

Ce dossier est organisé comme suit : tout d'abord, une revue de littérature sur la courbe de Kuznets sera présentée (I). Ensuite, nous décrirons les données utilisées (II) avant d'exposer les spécifications économétriques adoptées pour cette étude (III). Enfin, nous présenterons et discuterons les résultats obtenus (IV).

## I. Revue de littérature

Cette partie propose une revue de littérature structurée en trois parties. Tout d'abord, nous présenterons la théorie de la courbe de Kuznets, initialement développée pour décrire la relation entre le développement économique et les inégalités, et adaptée par la suite pour analyser le lien entre PIB et émissions de CO<sub>2</sub> (I.1). Ensuite, nous examinerons les travaux ayant confirmé ou infirmé cette théorie, qui suscite encore des débats académiques (I.2). Enfin, nous discuterons des justifications théoriques de l'inclusion de variables supplémentaires dans notre modèle (I.3).

### I.1 Théorie de la courbe de Kuznets : lien entre PIB et émissions de CO<sub>2</sub>

La courbe environnementale de Kuznets (EKC) est un concept théorique qui explore la relation entre le développement économique et la dégradation environnementale, en particulier la pollution. Popularisée par les travaux de Grossman et Krueger<sup>1</sup>, cette théorie postule que *"la pollution commence par augmenter avec le développement économique puis diminue au-delà d'un certain seuil de revenu par tête"*<sup>2</sup>. Ce phénomène, représenté par une courbe en "U" inversé, suggère qu'à mesure qu'une économie croît, elle tend d'abord à polluer davantage. Dans les premières phases de développement, la croissance économique, "associée à l'avènement de l'industrialisation et la modernisation de l'agriculture, cause une dégradation de l'environnement au delà des capacités d'assimilation des écosystèmes, et un taux d'épuisement des ressources naturelles"<sup>3</sup>. Cependant, lorsque le pays atteint un niveau de revenu plus élevé, la pollution commence à diminuer, grâce à des mécanismes économiques et institutionnels tels qu'une meilleure sensibilisation aux enjeux environnementaux et la mise en place de politiques environnementales plus strictes. Ce cadre théorique a servi de point de départ pour de nombreuses études sur la relation entre croissance économique et pollution.

Des études empiriques ont confirmé cette relation pour certains polluants. Grossman et Krueger, par exemple, ont mis en évidence une EKC pour des polluants locaux comme le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) et les particules fines. Selden et Song<sup>4</sup> ont également identifié cette relation à partir d'un large panel de données, bien que les seuils de retournement soient

---

<sup>1</sup> Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *The quarterly journal of economics*, 110(2), 353-377.

<sup>2</sup> Salin, M. (2020) . La « courbe de Kuznets environnementale » et le « découplage » : deux concepts du débat sur la croissance verte. *Regards croisés sur l'économie*, n° 26(1), 145-152. <https://doi.org/10.3917/rce.026.0145>.

<sup>3</sup> Hilali, M., & Ben Zina, N. (2007). Commerce et Environnement: une Relecture de la Courbe Environnementale de Kuznets. *Unité de Recherches sur la Dynamique Economique et l'Environnement (URDEE: UR/99/06-10), Faculté des Sciences Economiques et de Gestion Sfax-Tunis*.

<sup>4</sup> Selden, T. M., & Song, D. (1994). Environmental quality and development: is there a Kuznets curve for air pollution emissions?. *Journal of Environmental Economics and management*, 27(2), 147-162.

souvent situés à des niveaux de revenu élevés. Dans le cas des émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), Galeotti et Lanza<sup>5</sup> ont observé une EKC différenciée selon les groupes de pays, tandis que Richmond et Kaufmann<sup>6</sup> ont confirmé la courbe pour les pays développés, bien que les résultats soient moins probants pour les pays en développement. Toutefois, la validité de cette théorie dépend de nombreux facteurs, tels que les types de polluants étudiés, le contexte institutionnel et les disparités socio-économiques. Par exemple, Nordström et Vaughan<sup>7</sup> soulignent que l'EKC est davantage pertinente pour des polluants locaux et urbains, tandis que des polluants globaux comme le CO<sub>2</sub> suivent souvent des trajectoires différentes.

## I.2 Controverse autour de la courbe environnementale de Kuznets

Malgré son influence, la courbe environnementale de Kuznets demeure une théorie controversée. Certains chercheurs critiquent son universalité et soulignent ses limites. Stern<sup>8</sup> remet en question l'existence d'une causalité claire entre la croissance économique et la réduction de la pollution, dénonçant les simplifications méthodologiques et les biais économétriques présents dans certaines études. D'autres critiques mettent en lumière les dynamiques institutionnelles et politiques qui influencent fortement les trajectoires de pollution. Söderholm<sup>9</sup> insiste sur le rôle crucial des institutions dans l'efficacité des politiques environnementales, particulièrement dans les pays en développement où les structures institutionnelles sont souvent fragiles. Grossman et Krueger eux-mêmes reconnaissent que la diminution de la pollution dans les pays développés n'est pas automatique, mais résulte de pressions citoyennes et de choix politiques volontaristes.

Par ailleurs, certains auteurs remettent en question la forme même de la courbe. Kaufman et al.<sup>10</sup> montrent que la pollution peut augmenter à nouveau après une phase de déclin, en raison de nouvelles technologies ou de modes de consommation émergents. Des études spécifiques, comme celles de Vincent<sup>11</sup> en Malaisie et de Meunié<sup>12</sup> en Chine, montrent que la courbe n'est pas systématiquement vérifiée dans les pays en développement. De plus, le phénomène de délocalisation des industries polluantes vers ces pays, souvent appelé "fuite

---

<sup>5</sup> Galeotti M., Lanza A., (2015), « Desperately Seeking (Environmental) Kuznets », *Environmental Modelling and Software*, 20(11), pp.1379-1388.

<sup>6</sup> Richmond A.K., Kaufmann R.K., (2015), « Is there a Turning Point in the Relationship between Income and Energy use and/or Carbon Emission », *Ecological Economics*, 196(2), pp.176-189.

<sup>7</sup> Nordström H., Vaughan S., (2016), « Commerce et Environnement », dossiers spéciaux de l'OMC n° 14, Genève.

<sup>8</sup> Stern, D. I. (2004). The rise and fall of the environmental Kuznets curve. *World development*, 32(8), 1419-1439.

<sup>9</sup> Söderholm P., (2001), « Environmental Policy in Transition Economies: Will Pollution Charges Work? », *Journal of Environment and Development* 10(4), pp. 365-390.

<sup>10</sup> Kaufmann R.K., Davidsdottir B., Garnham S., Pauly P., (1998), « The Determinants of Atmospheric SO<sub>2</sub> Concentrations : Reconsidering the Environmental Kuznets curve », *Ecological Economics*, 25(2), pp. 209-220.

<sup>11</sup> Vincent J.R., (2013), « Testing for Environmental Kuznets Curves Within a Developing Country », *Environment and Development Economics*, 2(4), pp 417-433.

<sup>12</sup> Meunié A., (2004), « Controverses Autour de la Courbe Environnementale de Kuznets », document de travail n°107, Centre d'Économie de Développement, Université Bordeaux IV.

de carbone" (Copeland et Taylor, 2004<sup>13</sup>), remet en question l'idée d'une amélioration environnementale globale liée à la croissance économique.

Ainsi, bien que la courbe environnementale de Kuznets ait été largement confirmée pour certains polluants et dans des contextes spécifiques, elle ne peut être considérée comme universelle. Sa validité dépend de multiples facteurs, notamment le type de polluants, les structures institutionnelles et les disparités socio-économiques. Dans le cadre de notre étude, nous chercherons à déterminer si cette courbe peut être validée dans notre contexte spécifique.

### I.3 Les variables de contrôle pertinentes dans le modèle

Nous avons choisi d'enrichir le modèle avec des variables de contrôle afin de limiter le biais d'omission de variables, qui pourrait entraîner une surestimation ou une sous-estimation des coefficients associés au PIB. L'intégration de ces variables permet également d'améliorer la précision des estimations en réduisant la variance des erreurs résiduelles, ce qui facilite une identification plus robuste des relations entre les variables explicatives et les émissions de CO<sub>2</sub>.

Dans le modèle à effets fixes, les caractéristiques inobservables propres aux unités, qui sont invariantes dans le temps (par exemple, la géographie ou des institutions stables), sont déjà prises en compte. Cependant, certains facteurs évolutifs, tels que l'urbanisation, la structure énergétique ou le niveau d'ouverture commerciale, peuvent influencer simultanément le PIB et les émissions de CO<sub>2</sub> au fil du temps. Ajouter ces variables en tant que contrôles permet de capturer ces dynamiques temporelles et d'améliorer la qualité des estimations.

Dans le modèle à effets aléatoires, l'hypothèse d'indépendance entre les caractéristiques spécifiques des pays et les variables explicatives peut être compromise si des facteurs omis influencent à la fois les émissions de CO<sub>2</sub> et le PIB. L'ajout de variables de contrôle pertinentes contribue alors à réduire le biais des estimations et à renforcer la validité des résultats.

Nous détaillerons dans la section suivante le choix des variables d'urbanisation, de structure énergétique et de niveau d'ouverture commerciale.

## II. Description des données

Dans cette partie, nous détaillons tout d'abord le choix des variables intégrées dans nos modèles (II.1). Ensuite, nous présenterons des statistiques descriptives qui permettront d'explorer le profil des données et d'identifier les relations potentielles entre les différentes variables (II.2).

---

<sup>13</sup> Copeland, B. R., & Taylor, M. S. (2004). Trade, growth, and the environment. *Journal of Economic literature*, 42(1), 7-71.

## II.1 Choix des variables

### II.1.1 Variable dépendante : La pollution

Notre analyse vise à vérifier la validité empirique de la courbe environnementale de Kuznets, qui postule une relation en forme de "U inversé" entre le niveau de richesse économique et la dégradation de l'environnement. Pour évaluer cet impact, nous utilisons les émissions de CO<sub>2</sub> en tonnes métriques par habitant comme indicateur de pollution.

L'utilisation d'une mesure par habitant permet de neutraliser l'effet des différences de taille de population entre les pays étudiés, assurant ainsi une comparaison plus pertinente des niveaux de pollution. Cet indicateur est également couramment utilisé dans les études similaires en raison de sa disponibilité et de sa capacité à refléter les comportements individuels et collectifs liés à la consommation d'énergie et aux activités économiques.

### II.1.2 Le PIB par habitant

Dans le cadre de l'analyse empirique de la courbe environnementale de Kuznets, le PIB par habitant, mesuré en dollars internationaux courants en parité de pouvoir d'achat (PPA), constitue une mesure adaptée et cohérente pour représenter la richesse économique. Cette variable standardisée est largement reconnue dans la littérature économique pour comparer les niveaux de richesse entre pays tout en tenant compte de la taille de leur population.

### II.1.3 L'ouverture commerciale

L'ouverture commerciale a été choisie comme variable de contrôle en raison de son impact direct sur l'environnement. Pour les pays développés, une forte ouverture commerciale peut entraîner la délocalisation des activités polluantes vers les pays en développement, ce qui pourrait réduire les émissions domestiques tout en les augmentant ailleurs. En effet, "dans les pays en voie de développement cette ouverture commerciale contribue à la dégradation de l'environnement"<sup>14</sup>, notamment en raison de l'industrialisation et de l'utilisation d'énergies plus polluantes.

Pour mesurer cette variable, nous avons choisi d'utiliser le commerce en pourcentage du PIB, une mesure qui représente la somme des exportations et des importations de biens et services rapportée au PIB. Cet indicateur global est fréquemment utilisé pour évaluer le degré d'ouverture commerciale d'un pays et constitue une mesure fiable et standardisée dans les analyses économiques.

### II.1.4 L'urbanisation

Nous avons également choisi de retenir la variable urbanisation, car "le processus de développement s'accompagne, dans un premier temps, d'une pression de plus en plus forte sur les milieux naturels, conséquence du passage d'une économie rurale à une société

---

<sup>14</sup> Ben Abdeljelil, M. et Ben Ammou, S. (2017) . Chapitre 4. L'hypothèse de la courbe environnementale de Kuznets en Tunisie : le test de cointégration par les retards échelonnés. Dans Bastidon Gilles, C., Gbaguidi, O., Ghoufrane, A. et Silem, A. (dir.), Commerce, investissement et développement durable en Afrique. ( p. 105 -129 ). L'Harmattan. <https://doi.org/10.3917/har.silem.2017.01.0105>.



urbaine et industrielle”<sup>15</sup>. L’urbanisation peut avoir un effet direct sur le PIB en facilitant l’accès aux marchés et aux services. Elle peut aussi influencer les émissions de CO<sub>2</sub> de manière contrastée : d’une part, par une consommation énergétique accrue due à l’expansion des infrastructures urbaines, et d’autre part, par une éventuelle réduction des émissions grâce aux économies d’échelle réalisées dans les systèmes de transport et d’énergie.

Pour mesurer l’urbanisation des pays, nous avons retenu le pourcentage de la population totale vivant dans des zones urbaines. Cet indicateur permet d’évaluer précisément le degré d’urbanisation d’un pays à un moment donné.

### II.1.5 L’intensité énergétique

Enfin, l’intensité énergétique, mesurée par le niveau d’intensité énergétique primaire (MJ/\$2017 PPA PIB), a été retenue comme variable de contrôle. Cette mesure représente la quantité d’énergie primaire consommée (en mégajoules) par unité de PIB, ajustée en parité de pouvoir d’achat (PPA) et en dollars constants de 2017.

En intégrant ces ajustements, cette variable permet une comparaison équitable entre pays, indépendamment de leur taille ou de leur population. Elle constitue un indicateur clé de l’efficacité énergétique d’une économie, en établissant un lien direct entre la consommation d’énergie et la richesse économique générée. Une intensité énergétique élevée révèle qu’une économie utilise une grande quantité d’énergie pour produire une unité de PIB, ce qui est étroitement associé à des niveaux élevés d’émissions de CO<sub>2</sub>.

## II.2 Statistiques descriptives et corrélations

Nos données, issues de la Banque mondiale (The World Bank), forment un panel équilibré couvrant 146 pays sur la période 2000-2020. Cette période a été choisie pour maximiser la représentativité tout en conservant un échantillon significatif. Les pays présentant un nombre excessif de valeurs manquantes ont été exclus de l’étude afin de garantir la robustesse des analyses.

Les variables ont été transformées en logarithmes pour atténuer les effets des écarts importants entre les valeurs brutes, faciliter l’interprétation économique des résultats et assurer la cohérence avec les spécifications des modèles de régression, dans lesquels les variables sont également exprimées en logarithmes. Cette transformation contribue également à réduire naturellement l’influence des valeurs extrêmes en comprimant les écarts entre les valeurs très élevées et les plus faibles.

Après vérification à l’aide de boxplots et du test de Rosner réalisé sous R, nous avons confirmé que nos variables ne contiennent pas de valeurs extrêmes susceptibles de biaiser nos estimations. Cette étape renforce la fiabilité et la robustesse des résultats obtenus.

---

<sup>15</sup> Clément, M. et Meunié, A. (2010) . Inégalités, développement et qualité de l’environnement : mécanismes et application empirique. Mondes en développement, n° 151(3), 67-82.  
<https://doi.org/10.3917/med.151.0067>.

Concernant les statistiques principales, nous débutons notre analyse avec le **tableau 1**, qui présente les principales statistiques descriptives de la variable dépendante  $\ln(\text{CO}_2)$  ainsi que des variables explicatives utilisées dans notre modèle. Nous avons choisi de présenter les statistiques descriptives des variables en logarithmes, car cette transformation permet de mieux capturer les relations proportionnelles entre les variables et d'assurer la cohérence avec les spécifications des modèles économétriques, dans lesquels les variables sont également exprimées en logarithmes.

Tout d'abord, la variable dépendante  $\ln(\text{CO}_2)$ , avec un écart-type de 1,54, montre une forte dispersion des émissions de  $\text{CO}_2$ , s'étendant de -3,826 à 3,864. De même, la variable  $\ln(\text{PIB})$  présente également une dispersion notable, avec un écart-type de 1,207 et des valeurs allant de 6,041 à 12,005. La transformation quadratique de  $\ln(\text{PIB})$  ( $\ln(\text{PIB})^2$ ) entraîne une extension supplémentaire de l'échelle des valeurs, avec un écart-type de 21,803. En revanche, les variables  $\ln(\text{commerce})$ ,  $\ln(\text{urbanisation})$  et  $\ln(\text{énergie})$  affichent une dispersion plus modérée autour de la moyenne.

De plus, la proximité entre les moyennes et les médianes pour les variables  $\ln(\text{PIB})$ ,  $\ln(\text{commerce})$ ,  $\ln(\text{urbanisation})$  et  $\ln(\text{énergie})$  indique une distribution relativement symétrique des données. Toutefois, des asymétries sont observées pour  $\ln(\text{CO}_2)$  et  $\ln(\text{PIB})^2$ , dont les médianes sont légèrement supérieures à leurs moyennes, suggérant une légère asymétrie négative dans leurs distributions.

**Tableau 1 : Statistiques descriptives de la variable dépendante et des variables explicatives**

	Minimum	Q1	Moyenne	Médiane	Q3	Maximum	Ecart-type
$\ln(\text{CO}_2)$	-3.826	-0.299	0.647	0.984	1.851	3.864	1.540
$\ln(\text{PIB})$	6.041	8.149	9.136	9.246	10.154	12.005	1.207
$(\ln(\text{PIB}))^2$	36.494	66.398	84.923	85.491	103.102	144.116	21.803
$\ln(\text{commerce})$	2.298	3.984	4.311	4.321	4.635	6.081	0.506
$\ln(\text{urbanisation})$	2.110	3.719	3.970	4.070	4.331	4.605	0.459
$\ln(\text{énergie})$	0.191	1.206	1.546	1.483	1.836	3.292	0.478

Source : auteurs, logiciel : stata

Le **tableau 2** présente la matrice des corrélations entre les variables, offrant un aperçu des relations bilatérales entre celles-ci. Nous constatons une forte corrélation positive entre  $\ln(\text{CO}_2)$  et  $\ln(\text{PIB})$ , ainsi qu'avec  $(\ln(\text{PIB}))^2$  et  $\ln(\text{urbanisation})$ . Cela s'explique par le fait que les pays plus riches et plus urbanisés tendent à produire davantage d'émissions de  $\text{CO}_2$ , en raison d'une activité économique et d'une industrialisation accrues. Toutefois, la relation exacte entre le PIB et les émissions reste à vérifier dans le cadre de notre analyse.

En revanche, la corrélation entre  $\ln(\text{CO}_2)$  et  $\ln(\text{commerce})$  est plus modérée. Bien que l'ouverture commerciale puisse influencer les émissions, son impact dépend souvent de la structure économique des pays, de la composition des échanges et de l'intensité carbone des biens échangés.

À l'inverse, une corrélation négative faible est observée entre  $\ln(\text{CO}_2)$  et  $\ln(\text{énergie})$ . Cela peut refléter le fait que certains pays, malgré une consommation énergétique élevée, investissent davantage dans des technologies plus propres, réduisant ainsi l'intensité carbone de leur production énergétique.

Par ailleurs, une très forte corrélation est visible entre  $\ln(\text{PIB})$  et  $(\ln(\text{PIB}))^2$ , ce qui est attendu puisque cette dernière est calculée directement à partir de la première. Malgré cette interdépendance, l'inclusion des deux variables dans le modèle reste essentielle pour capturer et modéliser la relation non linéaire entre le PIB et les émissions de  $\text{CO}_2$ .

Nous notons également que  $\ln(\text{urbanisation})$  présente une corrélation positive assez marquée avec  $\ln(\text{PIB})$  et  $(\ln(\text{PIB}))^2$ , traduisant une relation étroite entre le niveau d'urbanisation et la richesse économique, les pays plus développés ayant souvent des populations plus concentrées dans les zones urbaines. Enfin,  $\ln(\text{énergie})$  est corrélée négativement avec l'ensemble des autres variables, reflétant une dynamique où certains pays réduisent leur consommation énergétique grâce à des gains d'efficacité énergétique ou à un recours accru aux sources d'énergie renouvelables.

*Tableau 2 : Matrice des corrélations*

	$\ln(\text{CO}_2)$	$\ln(\text{PIB})$	$(\ln(\text{PIB}))^2$	$\ln(\text{commerce})$	$\ln(\text{urbanisation})$	$\ln(\text{énergie})$
$\ln(\text{CO}_2)$	1					
$\ln(\text{PIB})$	0.915	1				
$(\ln(\text{PIB}))^2$	0.901	0.997	1			
$\ln(\text{commerce})$	0.388	0.367	0.367	1		
$\ln(\text{urbanisation})$	0.769	0.781	0.771	0.258	1	
$\ln(\text{énergie})$	-0.208	-0.400	-0.384	-0.126	-0.288	1

Source : auteurs, logiciel : stata

### III. Présentation des spécifications économétriques estimées

Pour cette étude, nous avons choisi d'utiliser l'économétrie de données de panel, une méthode particulièrement adaptée à notre analyse des interactions entre dynamiques économiques et environnementales. Cette approche permet de prendre en compte simultanément les variations entre différents pays et les évolutions temporelles sur une même période, offrant ainsi une vision enrichie et robuste des phénomènes étudiés.

Dans un premier temps, nous appliquerons un modèle à effets fixes (FE), suivi d'un modèle à effets aléatoires (RE). Le choix entre ces deux spécifications sera guidé par le test de Hausman, qui détermine si les effets spécifiques à chaque pays sont corrélés avec les variables explicatives. Une corrélation indiquerait une préférence pour le modèle à effets fixes, tandis qu'une absence de corrélation justifierait l'utilisation du modèle à effets aléatoires.

Le modèle à effets fixes est conçu pour tenir compte des caractéristiques inobservables propres à chaque pays ( $\alpha_i$ ), qui demeurent constantes dans le temps. Il utilise l'estimateur *within*, qui mesure les écarts par rapport à la moyenne individuelle pour chaque unité d'observation.

La spécification générale du modèle à effets fixes est donnée par :

$$y_{it} = X_{it}\beta + \alpha_i + \varepsilon_{it}$$

- $y_{it}$  : la variable dépendante.
- $X_{it}$  : le vecteur des variables explicatives
- $\beta$  : les coefficients associés aux variables explicatives.
- $\alpha_i$  : les effets fixes, propres à chaque unité  $i$ , qui capturent les caractéristiques inobservées constantes dans le temps.
- $\varepsilon_{it}$  : le terme d'erreur résiduelle.

Le modèle à effets aléatoires ( $y_{it} = X_{it}\beta + \alpha_i + \varepsilon_{it}$ ), en revanche, suppose que les caractéristiques spécifiques des pays ( $\alpha_i$ ) ne sont pas corrélées avec les variables explicatives, et les traite comme des composantes aléatoires. L'estimation des coefficients  $\beta$  dans le modèle à effets aléatoires se fait à l'aide de l'estimateur des Moindres Carrés Généralisés (MCG).

Afin de mieux capturer les relations proportionnelles entre les variables et d'améliorer l'interprétation des résultats, nous transformerons nos variables en logarithmes. Cela permet de représenter les élasticités directement dans les coefficients estimés, pour analyser les relations entre le PIB et les émissions de CO<sub>2</sub>.

Étant donné que la relation entre les émissions de CO<sub>2</sub> et le PIB est hypothétiquement non linéaire, conformément à l'hypothèse de la courbe environnementale de Kuznets, nous incluons le carré de  $\ln(\text{PIB})$  ( $\ln(\text{PIB})^2$ ) parmi les variables explicatives. Cela permettra de modéliser une éventuelle relation en cloche inversée, où les émissions augmentent dans les premières phases de croissance économique avant de diminuer au-delà d'un certain seuil.

Cette approche méthodologique nous permettra de mieux comprendre les dynamiques économiques et environnementales sous-jacentes et de tester empiriquement l'hypothèse de la courbe environnementale de Kuznets.

## IV. Présentation des estimations et discussion des résultats

Dans cette partie, nous commencerons par une analyse utilisant le modèle à effets fixes (IV.1), suivie d'une analyse avec le modèle à effets aléatoires (IV.2). Ensuite, nous comparerons les deux modèles à l'aide du test de Hausman (IV.3) avant d'interpréter (IV.4) et de discuter nos résultats (IV.5).

### IV.1 Résultats du modèle à effets fixes

Nous commençons notre analyse par le modèle à effets fixes en utilisant l'estimateur *within*. Les résultats du **tableau 3** montrent que ce modèle est pertinent. En effet, le F-test indique

une p-value à 0, signifiant qu'au moins une des variables explicatives est significative. La corrélation de 0,8005 entre les effets fixes non observés et les variables explicatives justifie l'utilisation du modèle à effets fixes. Le coefficient  $R^2_{\text{within}}$  est de 0,5023, indiquant que notre modèle explique 50,23 % de la variance au sein des groupes.

La variable  $\ln(\text{commerce})$  est la seule à ne pas être statistiquement significative, suggérant que l'ouverture commerciale n'exerce pas d'effet direct notable sur les émissions de  $\text{CO}_2$  dans ce contexte. En revanche, les quatre autres variables ont un impact significatif au seuil de risque de 1 %.

Pour vérifier la validité empirique de la courbe environnementale de Kuznets, nous nous concentrons sur les variables  $\ln(\text{PIB})$  et  $\ln(\text{PIB})^2$ . Le coefficient de  $\ln(\text{PIB})$  (2,88) est positif et significatif, tandis que celui de  $\ln(\text{PIB})^2$  (-0,14) est négatif et significatif. Ces résultats suggèrent une relation non linéaire : une augmentation de 1 % du PIB entraîne une hausse de 2,88 % des émissions de  $\text{CO}_2$  dans un premier temps, mais cet effet décroît à mesure que le PIB augmente, soutenant l'hypothèse de la courbe environnementale de Kuznets.

Enfin, deux des trois variables de contrôle,  $\ln(\text{urbanisation})$  et  $\ln(\text{énergie})$ , présentent un impact significatif et positif, soulignant leur rôle crucial dans l'explication des émissions de  $\text{CO}_2$ . L'inclusion de ces variables renforce la robustesse et la fiabilité des résultats en tenant compte d'autres facteurs influençant les émissions.

*Tableau 3 : Résultats des effets fixes (Annexe 1)*

Tableau 6 : Résultats des effets fixes (Annexe 1)

	Coefficient	Erreur standard	t	P> t	Intervalle de confiance (95%)
ln(PIB)	2.884	0.093	30.85	0.000	[2.701, 3.068]
ln(PIB) <sup>2</sup>	-0.138	0.005	-28.10	0.000	[-0.147, -0.128]
ln(commerce)	-0.018	0.016	-1.14	0.256	[-0.049, 0.013]
ln(urbanisation)	0.494	0.061	8.15	0.000	[0.375, 0.612]
ln(energie)	0.449	0.022	20.02	0.000	[0.405, 0.493]
constante	-16.576	0.377	-43.92	0.000	[-17.316, -15.836]
corr(u_i, Xb) = 0.8005		R <sup>2</sup> (within) = 0,502		R <sup>2</sup> (between) = 0,871	R <sup>2</sup> (overall) = 0,852
Nombre d'observation = 3066		Nombre de groupes = 146		F test : Prob > F = 0,0000	
sigma_u = 0,963		sigma_e = 0,145		rho = 0,978	

Source : auteurs, logiciel : stata

## IV.2 Résultats du modèle à effets aléatoires

Nous continuons notre analyse en utilisant le modèle des effets aléatoires dont les résultats sont présents dans le **tableau 4**. Ce modèle semble pertinent à appliquer ici, en effet, le test

Wald chi2 donne une p-value de 0, indiquant qu'au moins une des variables explicatives est statistiquement significative, ce qui justifie l'utilisation de ce modèle.

Tout comme pour le modèle à effets fixes, le modèle à effets aléatoires explique 85,2 % de la variance totale des émissions de CO2 ( $R^2$  global), ce qui montre une bonne capacité d'explication du modèle. Cependant, comme dans le modèle à effets fixes, la variable  $\ln(\text{commerce})$  n'est toujours pas significative, ce qui pourrait indiquer que l'ouverture commerciale n'a pas un effet direct et fort sur les émissions de CO2.

Les quatre autres variables sont significatives au seuil de 1 %. Elles ont une influence significative positive sur les émissions de CO2 sauf  $\ln(\text{PIB})^2$  qui a un impact négatif.

Concernant la courbe environnementale de Kuznets, les résultats semblent également la valider dans ce modèle. En effet, le coefficient de  $\ln(\text{PIB})$  est positif (2.782), indiquant qu'une augmentation du PIB est associée à une augmentation des émissions de CO2. Cependant, le coefficient de  $\ln(\text{PIB})^2$  est négatif (-0.129), ce qui suggère une relation non linéaire entre le PIB et les émissions : au départ, l'augmentation du PIB conduit à une hausse des émissions, mais cet effet se réduit à mesure que le PIB continue d'augmenter. Cela est en accord avec l'idée que, passé un certain niveau de développement économique, les émissions de CO2 commencent à diminuer à mesure que des politiques environnementales plus strictes ou des technologies plus propres sont mises en place.

Dans les deux modèles (effets fixes et aléatoires), deux des trois variables de contrôle ( $\ln(\text{urbanisation})$  et  $\ln(\text{énergie})$ ) ont un impact significatif et positif, confirmant leur importance dans l'analyse des émissions de CO2. Ces résultats soulignent la nécessité d'intégrer des variables de contrôle pour renforcer la robustesse des conclusions en tenant compte des multiples facteurs influençant les émissions.

Tableau 4 : Résultats des effets aléatoires (**Annexe 2**)

	Coefficient	Erreur standard	z	P> z	Intervalle de confiance (95%)
$\ln(\text{PIB})$	2.782	0.098	28.39	0.000	[2.590, 2.974]
$\ln(\text{PIB})^2$	-0.129	0.005	-25.04	0.000	[-0.139, -0.119]
$\ln(\text{commerce})$	0.006	0.017	0.35	0.727	[-0.027, 0.039]
$\ln(\text{urbanisation})$	0.772	0.057	13.61	0.000	[0.661, 0.883]
$\ln(\text{énergie})$	0.528	0.023	22.52	0.000	[0.482, 0.574]
constante	-17.706	0.407	-43.50	0.000	[-18.504, -16.908]
$R^2(\text{within}) = 0,497$		$R^2(\text{between}) = 0,867$		$R^2(\text{overall}) = 0,852$	
Nombre d'observation = 3 066		Nombre de groupes = 146		Wald chi2 : Prob > chi2 = 0,0000	
sigma_u = 0,386		sigma_e = 0,145		rho = 0,877	

Source : auteurs, logiciel : stata

### IV.3 Comparaison des modèles à effets fixes et aléatoires

Les résultats des deux modèles confirment la validité de la théorie de la courbe environnementale de Kuznets dans notre cas. Cependant, les coefficients estimés pour  $\ln(\text{PIB})$  et  $\ln(\text{PIB})^2$  dans le modèle à effets fixes sont supérieurs en valeur absolue à ceux du modèle à effets aléatoires.

Afin de déterminer le modèle le plus approprié pour notre analyse, nous utilisons le test de Hausman. Cependant, le test de Hausman classique n'a pas donné de résultats probants (**Annexe 3**), en effet, il a donné une statistique  $\chi^2$  négative, ce qui signifie que les hypothèses de ce test ne sont pas remplies. Cela peut être dû à la présence de la variable  $\ln(\text{PIB})^2$  qui dépend directement de la variable  $\ln(\text{PIB})$ . Nous utilisons alors une version plus robuste du test de Hausman, qui peut mieux gérer les problèmes de spécification et fournir des résultats plus fiables dans ce genre de situation.

Le résultat de ce deuxième test de Hausman (**Tableau 5 et Annexe 4**) indique une p-value de 0,00 ce qui permet de rejeter l'hypothèse nulle au seuil de 1%. Cela signifie que les deux modèles ne sont donc pas équivalents, et nous concluons que le modèle à effets fixes est le plus adapté. Cela suggère que les effets spécifiques à chaque pays sont corrélés avec les variables explicatives. Ce modèle est particulièrement pertinent car il permet de prendre en compte les spécificités nationales non observables, telles que les différences institutionnelles et économiques, qui peuvent influencer à la fois les émissions de  $\text{CO}_2$  et le PIB.

Tableau 5 : Test de Hausman

	Effets fixes	Effets aléatoires	Différence	Erreur standard
$\ln(\text{PIB})$	2.884	2.782	0.102	0.305
$\ln(\text{PIB})^2$	-0.138	-0.129	-0.009	0.002
$\ln(\text{commerce})$	-0.018	0.006	-0.024	0.004
$\ln(\text{urbanisation})$	0.494	0.772	-0.279	0.035
$\ln(\text{énergie})$	0.449	0.528	-0.079	0.008
$\chi^2(5) = 524.51$		$\text{Prob} > \chi^2 = 0.000$		

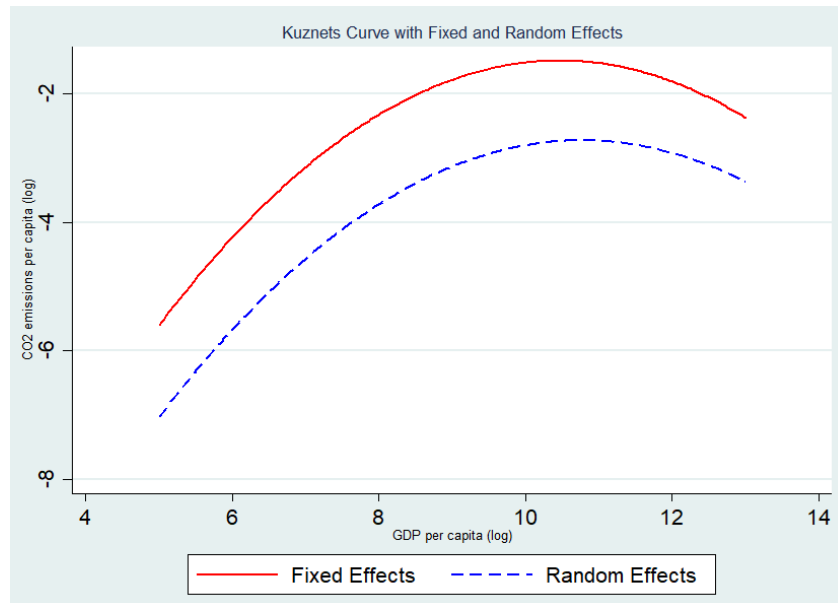
Source : auteurs, logiciel : stata

### IV.4 Interprétation du modèle à effets fixes

Finalement, si nous nous penchons davantage sur les résultats du modèle à effets fixes, nous pouvons tout d'abord visualiser la relation en "U" inversée entre le PIB par habitant et les émissions de  $\text{CO}_2$  sur le **graphique 1**. Cette relation illustre qu'à mesure que le PIB par habitant augmente, les émissions de  $\text{CO}_2$  augmentent initialement, atteignent un pic, puis diminuent lorsque le pays atteint un niveau de richesse jugé "suffisant". À noter que les

valeurs des émissions de CO2 sont exprimées en échelle logarithmique, ce qui explique les valeurs négatives.

Graphique 1 : Courbe environnementale de Kuznets avec le modèle à effets fixes et aléatoires



Source : Auteurs, logiciel : stata

Nous analysons ensuite le point de retournement de cette courbe, c'est-à-dire le seuil de PIB par habitant à partir duquel les émissions de CO2 commencent à diminuer. Ce point correspond au point d'inflexion, où la dérivée de la fonction est nulle.

La fonction estimée avec le modèle à effets fixes des émissions de CO2 est donnée par :

$$\ln(CO2) = -16.576 + 2.884 \times \ln(PIB) - 0.138 \times (\ln(PIB))^2$$

Pour déterminer le point de retournement, nous résolvons l'équation où la dérivée est égale à zéro :

$$d \div d\ln(PIB) = 2.884 + 2 \times (-0.138) \times \ln(PIB)$$

$$2.884 + 2 \times (-0.138) \times \ln(PIB) = 0$$

$$\Rightarrow \ln(PIB) = 2.884 \div 0.276 = 10.45$$

$$\Rightarrow PIB = e^{10.45} = 34\,544 \text{ \$ (PPA)}$$

Ainsi, le point de retournement est estimé à un PIB par habitant d'environ 34 544 \$ (PPA). Ce seuil marque une transition où les émissions de CO2 tendent à diminuer à mesure que les pays deviennent plus riches, probablement grâce à des technologies plus propres et à des politiques environnementales renforcées.

Dans notre échantillon, seulement 478 observations sur 3 066 présentent un PIB par habitant supérieur à 34 544 \$ (PPA), soit seulement 15,59 % de l'ensemble des données. En 2000, seulement 9 pays sur 146 analysés avaient atteint ce niveau de richesse,



représentant 6 % des pays. Cependant, en 2020, ce nombre est passé à 38 pays sur 146, soit 26 % des pays de l'échantillon.

Enfin, les effets fixes révèlent des spécificités nationales significatives dans les émissions de CO<sub>2</sub> (**Annexe 5**). Certains pays, comme la Zambie, le Burundi, Madagascar et l'Ouganda, présentent des effets fixes négatifs. Cela indique qu'ils sont associés à des facteurs non observables qui réduisent, en moyenne, leurs émissions de CO<sub>2</sub> par rapport à d'autres pays du modèle. Ces résultats peuvent s'expliquer par des économies moins industrialisées, une faible intensité carbone ou des pratiques agricoles traditionnelles. De plus, ces pays peuvent afficher un développement économique et une consommation d'énergie relativement faibles, ce qui limite mécaniquement leurs émissions. En revanche, des pays comme le Qatar, le Luxembourg et Brunei affichent les effets fixes les plus élevés, ce qui reflète des spécificités nationales qui augmentent les émissions de CO<sub>2</sub>. Ces caractéristiques sont souvent liées à des économies fortement dépendantes des ressources naturelles, comme le pétrole et le gaz, ou à des industries énergétiques très polluantes. Par exemple, le Qatar, grand producteur de pétrole et de gaz naturel, enregistre des émissions particulièrement élevées. Ces pays sont également caractérisés par des consommations énergétiques élevées et des secteurs industriels lourds, contribuant à intensifier leurs émissions de CO<sub>2</sub>, indépendamment de leur niveau de PIB.

#### IV.5 Discussion des résultats

Les résultats obtenus dans cette étude corroborent plusieurs conclusions avancées dans la littérature existante tout en soulevant des questions intéressantes. La validation empirique de la courbe environnementale de Kuznets (CEK), avec un point de retournement situé à un PIB par habitant de 34 544 \$ (PPA), est en ligne avec les travaux de Grossman et Krueger (1995), qui ont introduit cette hypothèse.

Les variables de contrôle apportent également des éclairages significatifs. L'effet positif et significatif de l'urbanisation sur les émissions de CO<sub>2</sub> est cohérent avec les conclusions de Clément et Meunié (2010), qui attribuent ce lien à l'intensité énergétique accrue des zones urbaines et à leur densité démographique. De même, l'impact positif de la consommation d'énergie confirme l'idée selon laquelle les structures énergétiques dominées par les combustibles fossiles augmentent les émissions de CO<sub>2</sub>.

En revanche, la non-significativité de la variable ln(commerce) interroge, car elle diverge des conclusions de Ben Abdeljelil et Ben Ammou (2017), qui ont mis en avant les effets contradictoires de l'ouverture commerciale sur l'environnement. Cette divergence pourrait s'expliquer par la coexistence de forces opposées : d'une part, la spécialisation dans des industries polluantes dans certains pays en développement, et d'autre part, la diffusion de technologies plus propres dans des pays avancés. Ces tensions pourraient neutraliser l'effet global de l'ouverture commerciale dans le contexte étudié.

Enfin, les spécificités nationales, capturées par les effets fixes, révèlent l'importance des structures institutionnelles et économiques propres à chaque pays. Ces résultats confirment que les différences nationales, telles que les politiques environnementales ou les ressources naturelles disponibles, influencent directement les émissions de CO<sub>2</sub>, en accord avec les observations de Clément et Meunié (2010).

## Conclusion

Les résultats de cette étude, menée sur 146 pays entre 2000 et 2020, confirment la validité de la courbe environnementale de Kuznets, avec un point de retournement observé à un PIB par habitant de 34 544 \$. En analysant les émissions de CO<sub>2</sub> en fonction du PIB, le modèle à effets fixes, privilégié suite au test de Hausman, montre que les émissions augmentent avec le développement économique avant de se stabiliser et de diminuer. Les variables de contrôle, telles que l'urbanisation et la consommation d'énergie, ont un impact positif et significatif sur les émissions, tandis que l'ouverture commerciale ne semble pas influencer directement les émissions de CO<sub>2</sub>. Les effets fixes mettent en évidence l'importance des spécificités nationales, avec des différences marquées entre les pays développés et les pays en développement.

Au vu de ces résultats, il est recommandé que les pays dont le PIB par habitant approche ou dépasse le seuil de 34 544 \$ adoptent des politiques environnementales plus rigoureuses et favorisent des transitions énergétiques vers des solutions durables, notamment par l'innovation verte et des technologies propres. Pour les pays en développement, une priorité devrait être donnée à l'amélioration de l'efficacité énergétique et à la réduction des émissions grâce à des investissements dans des infrastructures écologiques et des politiques incitatives pour une croissance verte.

Néanmoins, nous devons mentionner que cette étude présente plusieurs limites. Tout d'abord, la période de 2000 à 2020 ne prend pas en compte les impacts potentiels de la crise économique de 2008 ou des changements récents liés à la pandémie de COVID-19. De plus, bien que le modèle à effets fixes ait été privilégié pour tenir compte des spécificités nationales, il ne capture pas les dynamiques internationales qui peuvent aussi influencer les émissions de CO<sub>2</sub>, comme les accords climatiques mondiaux. Enfin, cette étude ouvre la voie à de futures recherches sur les interactions entre les politiques économiques, les stratégies environnementales et les transitions énergétiques. Une extension de cette analyse pourrait inclure l'étude de l'impact des accords climatiques internationaux, tels que l'Accord de Paris, sur les émissions de CO<sub>2</sub> à l'échelle mondiale. En outre, l'évolution rapide des technologies vertes et leur intégration dans les processus de production pourraient modifier la dynamique de la courbe environnementale de Kuznets. Une analyse plus approfondie de ces éléments permettrait de mieux comprendre les leviers d'action pour réduire les émissions de gaz à effet de serre tout en favorisant la croissance économique durable.

## Bibliographie

Ben Abdeljelil, M. et Ben Ammou, S. (2017) . Chapitre 4. L'hypothèse de la courbe environnementale de Kuznets en Tunisie : le test de cointégration par les retards échelonnés. Dans Bastidon Gilles, C., Gbaguidi, O., Ghoufrane, A. et Silem, A. (dir.), Commerce, investissement et développement durable en Afrique. ( p. 105 -129 ). L'Harmattan. <https://doi.org/10.3917/har.silem.2017.01.0105>.

Clément, M. et Meunié, A. (2010) . Inégalités, développement et qualité de l'environnement : mécanismes et application empirique. Mondes en développement, n° 151(3), 67-82. <https://doi.org/10.3917/med.151.0067>.

Copeland, B. R., & Taylor, M. S. (2004). Trade, growth, and the environment. *Journal of Economic literature*, 42(1), 7-71.

Galeotti M., Lanza A., (2015), « Desperately Seeking (Environmental) Kuznets », *Environmental Modelling and Software*, 20(11), pp.1379-1388.

Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *The quarterly journal of economics*, 110(2), 353-377.

Hilali, M., & Ben Zina, N. (2007). Commerce et Environnement: une Relecture de la Courbe Environnementale de Kuznets. *Unité de Recherches sur la Dynamique Economique et l'Environnement (URDEE: UR/99/06-10), Faculté des Sciences Economiques et de Gestion Sfax-Tunisie*.

Kaufmann R.K., Davidsdottir B., Garnham S., Pauly P., (1998), «The Determinants of Atmospheric SO<sub>2</sub> Concentrations : Reconsidering the Environmental Kuznets curve», *Ecological Economics*, 25(2),pp. 209-220.

Meunié A., (2004), « Controverses Autour de la Courbe Environnementale de Kuznets », document de travail n°107, Centre d'Économie de Développement, Université Bordeaux IV.

Nordström H., Vaughan S., (2016), «Commerce et Environnement», dossiers spéciaux de l'OMC n° 14, Genève.

Richmond A.K., Kaufmann R.K., (2015), «Is there a Turning Point in the Relationship between Income and Energy use and/or Carbon Emission », *Ecological Economics*, 196(2), pp.176-189.

Salin, M. (2020) . La « courbe de Kuznets environnementale » et le « découplage » : deux concepts du débat sur la croissance verte. *Regards croisés sur l'économie*, n° 26(1), 145-152. <https://doi.org/10.3917/rce.026.0145>.

Selden, T. M., & Song, D. (1994). Environmental quality and development: is there a Kuznets curve for air pollution emissions?. *Journal of Environmental Economics and management*, 27(2), 147-162.

Söderholm P., (2001), « Environmental Policy in Transition Economies: Will Pollution Charges Work? », *Journal of Environment and Development* 10(4), pp. 365-390.

Stern, D. I. (2004). The rise and fall of the environmental Kuznets curve. *World development*, 32(8), 1419-1439.

Vincent J.R., (2013), « Testing for Environmental Kuznets Curves Within a Developing Country », *Environment and Development Economics*, 2(4), pp 417-433.

## Annexes

### Annexe 1 : Sortie stata des effets fixes :

. xtreg ln_CO2 ln_PIB ln_PIB_carre ln_commer ln_urba ln_ener,i(countrycode_num) fe						
Fixed-effects (within) regression			Number of obs	=	3,066	
Group variable: countrycod~m			Number of groups	=	146	
R-sq:			Obs per group:			
within	=	0.5023	min	=	21	
between	=	0.8705	avg	=	21.0	
overall	=	0.8520	max	=	21	
corr(u_i, Xb) = 0.8005			F(5, 2915)	=	588.41	
			Prob > F	=	0.0000	
ln_CO2	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
ln_PIB	2.884205	.0934951	30.85	0.000	2.700882	3.067528
ln_PIB_carre	-.1378317	.004905	-28.10	0.000	-.1474493	-.1282141
ln_commer	-.0178112	.0156728	-1.14	0.256	-.0485421	.0129196
ln_urba	.4935849	.0605522	8.15	0.000	.3748554	.6123144
ln_ener	.4493638	.0224442	20.02	0.000	.4053557	.4933718
_cons	-16.57555	.3774129	-43.92	0.000	-17.31558	-15.83553
sigma_u	.96335747					
sigma_e	.14454312					
rho	.97798334	(fraction of variance due to u_i)				
F test that all u i=0: F(145, 2915) = 189.71				Prob > F = 0.0000		

### Annexe 2 : Sortie stata des effets aléatoires :

. xtreg ln_CO2 ln_PIB ln_PIB_carre ln_commer ln_urba ln_ener,i(countrycode_num) re						
Random-effects GLS regression			Number of obs	=	3,066	
Group variable: countrycod~m			Number of groups	=	146	
R-sq:			Obs per group:			
within = 0.4965			min = 21			
between = 0.8665			avg = 21.0			
overall = 0.8518			max = 21			
corr(u_i, X) = 0 (assumed)			Wald chi2(5)	=	3685.68	
			Prob > chi2	=	0.0000	
ln_CO2	Coef.	Std. Err.	z	P> z	[95% Conf. Interval]	
ln_PIB	2.781735	.0979972	28.39	0.000	2.589664	2.973806
ln_PIB_carre	-.1291465	.0051586	-25.04	0.000	-.1392572	-.1190359
ln_commer	.0058601	.0168078	0.35	0.727	-.0270825	.0388027
ln_urba	.7720761	.0567173	13.61	0.000	.6609122	.88324
ln_ener	.5278861	.0234368	22.52	0.000	.4819508	.5738214
_cons	-17.70604	.4070071	-43.50	0.000	-18.50376	-16.90832
sigma_u	.38584512					
sigma_e	.14454312					
rho	.87693459	(fraction of variance due to u_i)				

### Annexe 3 : Sortie stata du test de Hausman :

. hausman lnefixe lnealeatoire				
	Coefficients			
	(b)	(B)	(b-B)	sqrt(diag(V_b-V_B))
	lnefixe	lnealeatoire	Difference	S.E.
ln_PIB	2.884205	2.781735	.1024696	.
ln_PIB_carre	-.1378317	-.1291465	-.0086851	.
ln_commer	-.0178112	.0058601	-.0236713	.
ln_urba	.4935849	.7720761	-.2784912	.0212067
ln_ener	.4493638	.5278861	-.0785223	.
b = consistent under Ho and Ha; obtained from xtreg				
B = inconsistent under Ha, efficient under Ho; obtained from xtreg				
Test: Ho: difference in coefficients not systematic				
chi2(5) = (b-B)'[(V_b-V_B)^(-1)](b-B)				
= -88.73 chi2<0 ==> model fitted on these				
data fails to meet the asymptotic				
assumptions of the Hausman test;				
see <a href="#">suest</a> for a generalized test				

### Annexe 4 : Sortie stata du test de Hausman robuste (sigmamore) :

. hausman lnefixe lnealeatoire, sigmamore				
	Coefficients			
	(b)	(B)	(b-B)	sqrt(diag(V_b-V_B))
	lnefixe	lnealeatoire	Difference	S.E.
ln_PIB	2.884205	2.781735	.1024696	.0304785
ln_PIB_carre	-.1378317	-.1291465	-.0086851	.0015419
ln_commer	-.0178112	.0058601	-.0236713	.0036695
ln_urba	.4935849	.7720761	-.2784912	.0346553
ln_ener	.4493638	.5278861	-.0785223	.0075942
b = consistent under Ho and Ha; obtained from xtreg				
B = inconsistent under Ha, efficient under Ho; obtained from xtreg				
Test: Ho: difference in coefficients not systematic				
chi2(5) = (b-B)'[(V_b-V_B)^(-1)](b-B)				
= 524.51				
Prob>chi2 = 0.0000				

### Annexe 5 : Les 10 pays avec les effets fixes les plus élevés ou les plus faibles

countryname	effets_~s
Qatar	2.232186
Luxembourg	1.998759
Brunei Darussalam	1.621258
Australia	1.489159
United States	1.4784
Zambia	-1.771828
Burundi	-1.778518
Madagascar	-1.988331
Uganda	-2.142114
Central African Republic	-2.2916
Congo, Dem. Rep.	-2.561579

# Table des matières

Sommaire.....	3
<b>Introduction.....</b>	<b>4</b>
<b>I. Revue de littérature.....</b>	<b>5</b>
I.1 Théorie de la courbe de Kuznets : lien entre PIB et émissions de CO <sub>2</sub> .....	5
I.2 Controverse autour de la courbe environnementale de Kuznets.....	6
I.3 Les variables de contrôle pertinentes dans le modèle.....	7
<b>II. Description des données.....</b>	<b>7</b>
II.1 Choix des variables.....	8
II.1.1 Variable dépendante : La pollution.....	8
II.1.2 Le PIB par habitant.....	8
II.1.3 L'ouverture commerciale.....	8
II.1.4 L'urbanisation.....	8
II.1.5 L'intensité énergétique.....	9
II.2 Statistiques descriptives et corrélations.....	9
<b>III. Présentation des spécifications économétriques estimées.....</b>	<b>11</b>
<b>IV. Présentation des estimations et discussion des résultats.....</b>	<b>12</b>
IV.1 Résultats du modèle à effets fixes.....	12
IV.2 Résultats du modèle à effets aléatoires.....	13
IV.3 Comparaison des modèles à effets fixes et aléatoires.....	15
IV.4 Interprétation du modèle à effets fixes.....	15
IV.5 Discussion des résultats.....	17
<b>Bibliographie.....</b>	<b>19</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>20</b>
<b>Table des matières.....</b>	<b>22</b>