# THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

**En Sciences Économiques**

**École doctorale : Ecole Doctorale Economie Gestion (EDEG, ED 231)**

**Unité de recherche : Montpellier Recherche en Economie (MRE, EA 7491)**

# LES ENERGIES RENOUVELABLES PEUVENT ELLES LUTTER CONTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE?

**Présentée par Muhammad SAQIB**

**Le 9 septembre 2022**

**Sous la direction de François BENHMAD**

**Devant le jury composé de**

| | |
|---|---|
| Jacques PERCEBOIS, Professeur Émérite, Université de Montpellier | Président |
| Patrice GEOFFRON, Professeur des universités, Université Paris Dauphine | Rapporteur |
| Zied FTITI, Maître de conférences HDR, EDC Paris Business School | Rapporteur |
| Jules SADEFO-KAMDEM, Professeur des Universités, Université de Montpellier | Invité |
| François BENHMAD, Maître de conférences HDR, Université de Montpellier | Directeur de thèse |

UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

# DEDICACE

*Je dédie ce modeste travaille*

*« A la mémoire de mes parents trop tôt disparus. J'espère que leurs âmes apprécieront cet humble geste comme une preuve de gratitude de la part d'un fils qui a toujours prié pour qu'ils reposent en paix. Que Dieu, le tout-puissant, les accueille dans sa sainte miséricorde. »*

## Remerciements

Je tiens en premier lieu à exprimer toute ma gratitude à M. François BENHMAD, mon directeur de thèse, pour sa grande disponibilité de tous les instants et son soutien au cours de ces quatre années de thèse. Son exigence et son ouverture scientifique, sa rigueur et son enthousiasme très communicatif, ses critiques et ses encouragements m'ont immensément aidé à améliorer la qualité de mon travail de recherche.

Mes sincères remerciements au Professeur PERCEBOIS qui m'a honoré en acceptant d'être membre du jury. Ma grande gratitude au Professeur Patrice GEOFFRON et au Docteur Zied FTITI qui m'ont fait le privilège d'accepter d'être les rapporteurs de ma thèse. Mon immense reconnaissance au Professeur Jules SADEFO-KAMDEM qui a également accepté d'être membre du jury de ma thèse.

J'exprime par ailleurs ma reconnaissance au laboratoire d'accueil (MRE), l'école doctorale (EDEG) et la faculté d'économie d'avoir gardé les portes ouvertes pour y trouver un espace dans lequel j'ai pu me sentir à l'aise et être productif, à l'instar de Sabine, s'assurant avec diplomatie du bon déroulement des procédures administratives.

Je suis également très reconnaissant à la Commission de l'enseignement supérieur (HEC) du Pakistan qui m'a fourni une bourse pour mes études doctorales.

Je ne peux pas oublier de mentionner le Professeur Nadeem IQBAL de l'Université de Peshawar au Pakistan qui m'a guidé tout le temps et m'a soutenu moralement.

Je souhaite aussi adresser mes chaleureux remerciements à tous les membres de ma famille qui ont été toujours à mes côtés.

Il m'est également impossible d'oublier mes amis et estimés collègues notamment Houda, Feriel, Imane, Boumediene, Awada, Ayad, et Walid pour leurs suggestion, soutien, compréhension et gentillesse durant toute cette période.

Que ce modeste travail témoigne de ma reconnaissance et de mes sentiments les plus profonds envers tous ceux et celles qui ont de près ou de loin contribué à sa réalisation.

« L’Université n’entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans cette thèse : ces opinions doivent être considérées comme propres à leur auteur. »

**Plan de thèse**

La thèse comporte trois articles écrits en anglais :

- Updated meta-analysis of environmental Kuznets curve: Where do we stand? (Muhammad SAQIB, François BENHMAD), **publié** en 2021 à la revue *Environmental Impact Assessment Review*, 86, 106503.
- Does ecological footprint matter for the shape of the environmental Kuznets curve? Evidence from European countries (Muhammad SAQIB, François BENHMAD), **publié** en 2021 à la revue *Environmental Science and Pollution Research* 28 (11), 13634-13648.
- Towards net zero carbon emission: Renewable energy deployment and carbon emission mitigation in Europe (Muhammad SAQIB, François BENHMAD), **soumis** en 2022 à la revue *Energy Economics*.

**Résumé**

Les États membres de l'UE se sont engagés à poursuivre les actions de réduction des émissions et à atteindre le niveau de développement durable. Au cours des deux dernières décennies, les énergies renouvelables (ER) sont devenues la principale source d'énergie. Les émissions annuelles de $CO_2$ dans l'UE ont diminué de manière constante, bien que les objectifs mondiaux n'aient pas été entièrement atteints. Il est donc nécessaire d'examiner le rôle potentiel des énergies renouvelables dans la réduction des émissions de carbone, et donc dans la réalisation des objectifs de l'Accord de Paris, et de la Deal verte européenne.

À cette fin, nous avons choisi la théorie de l'EKC qui explique comment les activités économiques affectent la qualité de l'environnement à court et à long terme. Dans la littérature, nous avons constaté que plusieurs études (environ 57%) confirment la validité empirique de l'EKC. Alors que la majeure partie de la littérature (environ 43%) n'a trouvé aucune relation ou une relation très faible. Ceux qui valident les hypothèses de l'EKC, favorisent l'utilisation de l'EKC pour les implications politiques tandis que les autres s'y opposent fortement.

Dans le premier chapitre, nous avons effectué une méta-analyse pour étudier les variations entre les résultats existants. Nous avons développé un cadre, appelé PRIMRA, qui fournit des étapes utiles pour mener une méta-analyse. La présente étude a été réalisée en utilisant le même cadre. Nous avons trouvé des preuves solides de l'existence de l'EKC. Il a été constaté que la relation EKC est un phénomène à long terme et qu'elle n'est pas liée au choix des variables contrôlées ou de la méthodologie économétrique (seule la méthodologie Pooled Mean Group (PMG) est significative). Bien que les résultats montrent des variations avec le choix des indicateurs de dégradation de l'environnement.

Pour étudier ces variations, nous avons réalisé le deuxième chapitre en adoptant un indicateur environnemental global et une méthodologie qui s'est avérée significative dans le premier chapitre. Ce chapitre est la validation empirique de l'EKC en adoptant l'empreinte écologique qui compte la charge globale de

l'homme sur la terre. En utilisant les méthodologies PMG et AMG, nous avons à nouveau constaté l'existence de l'EKC pour l'Union européenne. Nous avons également constaté que la croissance de la population semble insignifiante pour déterminer l'empreinte écologique, alors que la consommation d'énergie dégrade l'environnement.

Le troisième chapitre étudie l'impact des ER et des énergies fossiles individuellement sur le niveau des émissions de carbone dans l'Union européenne. Une fois encore, en utilisant la méthodologie PMG, nous avons constaté que c'est l'énergie fossile qui est la principale cause de $CO_2$. En effet, les ER ont une corrélation négative avec le $CO_2$. Cela peut être interprété comme une augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique qui peut aider à réduire le $CO_2$ sans perturber le rythme de la croissance économique. L'augmentation annuelle moyenne de la part des énergies renouvelables est de 1,61 % et la baisse annuelle moyenne du $CO_2$ est de 0,62 % pour la période de référence. Cela signifie que la baisse du $CO_2$ n'est pas unitairement élastique à l'augmentation de la part des ER et que le taux de déploiement devrait être augmenté à 12% par an afin d'atteindre les objectifs de l'accord de Paris.

**Mots-clés** : EKC, émission de carbone, changement climatique, méta-analyse, empreinte écologique, énergie renouvelable, neutralité carbone.

## Summary

EU Member States have committed to continue actions of reducing emission and to achieve the level of sustainable development. In the past two decades, renewable energy (RE) has become the primary source of energy. The annual $CO_2$ in the EU has been steadily declining, although the global targets have not been fully met. It is therefore necessary to examine the potential role of renewable energy in reducing carbon emissions, and thus in achieving the goals of the Paris Agreement, and the European Green Deal.

For this purpose, we have chosen the theory of EKC that explains how economic activities affect the environmental quality in the short run as well as in the long run. In the literature we have found that several studies (Approx 57%) confirm the empirical validity of the EKC. While major part of the literature (Approx 43%) has found either no relation or very weak relationship. Those who validate EKC hypotheses favor the use of EKC for policy implications while the rest strongly oppose the interpretation of EKC as a basis for environmental policy formulation.

In the first chapter we have conducted a meta-analysis to study the variations among the existing findings. We have developed a framework, named PRIMRA, that provides useful steps for conducting meta-analysis. This study itself has been carried out using the same framework. We have found strong evidence for the existence of EKC. It has been found that the EKC relationship is a long run phenomenon and is irrelevant to the choice of controlled variables or econometric methodology (only Pooled Mean Group (PMG) methodology is significant). Although the results show variations with the choice of environmental degradation indicators.

To study these variations, we have conducted the second chapter by adopting a global

environmental indicator and methodology that has been found significant in the first chapter. This chapter is the empirical validation of EKC by adopting ecological footprint which counts the overall burden of human on earth. Using the PMG and AMG methodologies, we have again found the existence of EKC for European union. We have further found that population growth appeared insignificant in determining ecological footprint while energy consumption degrades the environment.

The third chapter investigates the impact of RE and fossil energy individually on the level of carbon emissions in European union. Again, using the PMG methodology we have found that it is fossil energy which is the main cause of $CO_2$. Because RE has been found negatively correlated to $CO_2$. This can be interpreted as that increasing the RE share in the energy mix can help in reducing $CO_2$ without disrupting the speed of economic growth. The average annual increase in the share of RE is 1.61% and average annual fall in $CO_2$ is 0.62% for the sample period. This means that fall in $CO_2$ is not unitary elastic to increase in RE so the rate of deployment should be increased to 12% per year to achieve the objectives of Paris agreement.

**Keywords**: EKC, Carbon emission, climate change, Meta-Analysis, Ecological Footprint, Renewable Energy, Carbon Neutrality.

# Sommaire


INTRODUCTION GENERALE 01

**CHAPITRE 1** : Une méta-analyse de la courbe de Kuznets environnementale 14

SECTION 1 : Introduction 14

SECTION 2 : Analyse de Meta-Régression 17

SECTION 3: Preferred Reporting Analysis for Meta Regression Analysis 18

SECTION 4 : Résultats empiriques et discussions 35

SECTION 5 : Conclusion et implications Empiriques 47

ANNEXE 1 52

**CHAPITRE 2** : L'analyse empirique de la courbe de Kuznets : Cas des pays Européennes 54

SECTION 1 : Introduction 54

SECTION 2 : Revue de la littérature 59

SECTION 3 : Le Modèle 66

SECTION 4 : Données et Méthodologie d'estimations 68

SECTION 5 : Les résultats empiriques 78

SECTION 6 : Conclusion 88

**CHAPITRE 3** : Le rôle des énergies renouvelables dans la neutralité carbone : Cas des pays Européens 91

SECTION 1 : Introduction 91

SECTION 2 : Transition énergétique en Europe 97

SECTION 3 : Le Modèle 103

SECTION 4 : Données 106

SECTION 5 : Méthodologie et les résultats empiriques 111

SECTION 6 : Discussion et implications politiques 126

SECTION 7 : Conclusion 132

ANNEXE 3 136

CONCLUSION GENERALE 151

REFERENCES 159

LISTE DES FIGURES 169

LISTE DES TABLEAUX 170

TABLE DES MATIERES 171

# Introduction Générale

En 1972, le Club de Rome publie le rapport Meadows qui s'intitule "The Limits To Growth" ou " Halte à la croissance" selon la traduction française. Ce rapport continue de représenter une référence des débats qui posent la question des limites environnementales à l'augmentation des richesses matérielles. Autrement dit, ce rapport explore les conséquences de la croissance économique, de l'évolution démographique sur la qualité de l'environnement.

La prise de conscience des risques globaux que fait peser l'augmentation incontrôlée des pollutions induites par les activités humaines a permis l'émergence du concept de développement durable ou soutenable qui repose sur 3 piliers du développement qu'il serait impératif de concilier : l'aspect économique, l'aspect social, et l'aspect environnemental.

Ainsi, la durabilité ou soutenabilité du développement doit répondre aux besoins des générations présentes sans compromettre la capacité de satisfaire ceux des générations futures.

Le rapport Meadows a donné naissance à de très larges débats et controverses entre les économistes relatifs aux limites environnementales de la croissance économique.

L'une des premières tentatives théoriques a consisté en l'intégration de la contrainte écologique dans les modèles de croissance économique en introduisant le concept de "capital naturel".

Le capital naturel peut désigner les actifs naturels relatifs à la production des ressources (le bois, l'herbe, les ressources animales, les ressources énergétiques), à l'assimilation

des déchets, aux qualités environnementales indispensables à une vie durable sur la Terre (protection contre le rayonnement UV, qualité de l'air, de l'eau).

Le capital naturel est en interaction avec d'autres types de capitaux pour former le capital global à savoir le capital humain, manufacturier et financier. Si l'on accepte l'hypothèse de substituabilité entre les différents types de capitaux, il suffit alors d'identifier les conditions qui permettent au progrès technologique de compenser les dégradations subies par l'environnement ou capital naturel par l'accroissement des stocks d'autres formes de capitaux.

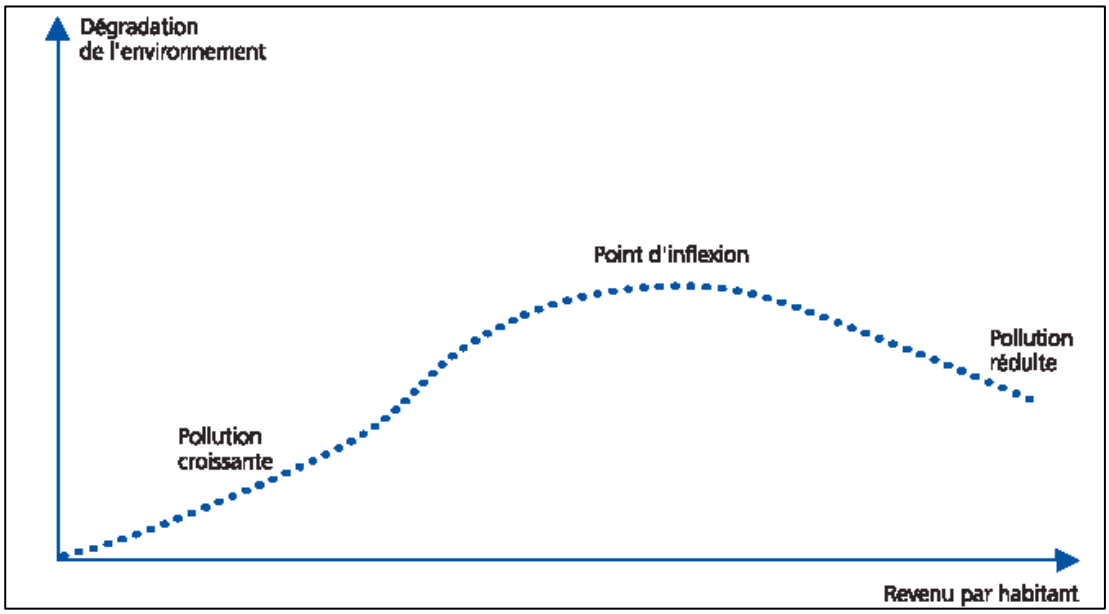
Bien que cette réponse puisse sembler très élégante du point de vue de sa construction théorique, elle ne remet pas en question le fait que la croissance économique risquerait d'être incompatible avec la préservation d'une bonne qualité de l'environnement. En effet, selon cette approche, la croissance économique permet la création de richesses. Les pays développés seraient tellement riches qu'ils auraient suffisamment de ressources financières en vue de les allouer à l'amélioration de l'environnement qui a été dégradé seraient aux premiers stades de leur croissance. Ainsi, la croissance économique pourrait être soutenable.

Autrement dit, selon cette approche, la relation entre la dégradation de l'environnement et le niveau de revenu par tête aurait ainsi une forme en U inversé. C'est le postulat sur lequel repose le concept de courbe environnementale de Kuznets (EKC en Anglais). Cette courbe environnementale s'inspire des travaux de Simon Kuznets qui en 1955. Grossman et Krueger (1995) transposent à l'écologie les travaux de Simon Kuznets, datant de 1955 qui a décelé une relation en U inverse (en cloche) entre le niveau de revenu par tête et les inégalités sociales. Pour Kuznets, ces inégalités s'accroissent avec

le revenu moyen pendant un premier temps, pour se réduire ensuite, selon une courbe en cloche, qui porte son nom.

A l'instar de ces travaux, plusieurs études empiriques ont mis en évidence que l'évolution de certains polluants selon le niveau du PIB par tête de plusieurs pays suivent un sentier similaire à la courbe en cloche de Kuznets introduite en 1955. Ainsi, la courbe de Kuznets environnementale peut être représentée par la figure 0.1 suivante:

**Figure 0.1: Courbe environnementale de Kuznets**




Source : OMC (1999).

Selon les auteurs adeptes de la courbe de Kuznets environnementale, à des niveaux de richesse par tête très faibles, les dégradations environnementales d'origine anthropique se limitent à l'impact des activités économiques de subsistance. Mais, au fur et à mesure de l'intensification de la production agricole, de l'urbanisation des populations, et du décollage industriel, on assiste à une augmentation considérable de l'extraction des ressources naturelles et des rejets massifs de polluants, et donc à de fortes pressions sur les écosystèmes naturels.

Toutefois, le processus de croissance économique enregistré par les pays développés leur permet de disposer de suffisamment de richesse dont une partie pourrait être orientée vers des investissements dont l'objectif est la diminution de l'empreinte écologique des processus productifs.

Ceci d'autant plus, que la création de richesse, qui aboutirait à une amélioration considérable des conditions de vie matérielles de la population, inciterait les individus à sacrifier une partie de leurs revenus monétaires en faveur de la lutte de la dégradation de l'environnement. Il y aurait donc un renversement dans le sens de la relation entre la croissance économique et la dégradation environnementale (ou une forme en U inverse) qui résulte de l'augmentation des revenus individuels.

L'hypothèse de la courbe de Kuznets environnementale est basée sur un postulat selon lequel l'environnement serait un « bien supérieur ». Rappelons qu'un bien est dit supérieur si la demande pour ce bien augmente avec le revenu. Il s'agit là d'un postulat dont la validité est très plausible dont la mesure où pour les pays les plus pauvres, les individus se préoccupent de se nourrir, se loger, se vêtir. La priorité de ces préoccupations ne serait laissée de place à d'autres préoccupations fussent-elles environnementales. Ce qui est vrai au niveau individuel l'est aussi au niveau national puisque l'ensemble des pays du Sud sont moins sensibles aux questions environnementales que les pays riches et développés du Nord.

Toutefois, l'augmentation du revenu par tête s'accompagne souvent de demandes sociales nouvelles, en particulier des exigences en termes de qualité de l'environnement. Ceci d'autant plus que la création de richesse due à la croissance continue du PIB permet d'allouer plus aisément des ressources financières pour investir dans des politiques environnementales. Ainsi, lorsque le revenu national et donc le revenu par tête sont

suffisamment élevés, il est beaucoup plus facile de faire un arbitrage qui sacrifie une partie de la consommation en faveur d'une protection de l'environnement à la fois à l'échelon individuel et national.

On peut donc conclure que selon les études empiriques, la croissance économique serait "fortement corrélée" à l'amélioration de l'état de l'environnement à partir d'un certain niveau de richesse ou seuil de revenu. Par conséquent, pour lutter contre la dégradation de l'environnement à l'échelle de la planète, il suffirait de mener des politiques économiques qui permettraient aux pays en voie de développement d'atteindre le plus rapidement possible les mêmes niveaux de richesse par tête que les pays riches. Il s'agit d'une croyance selon laquelle le seul sentier possible pour les pays en voie de développement retrouver la qualité de l'environnement, qui a été dégradé aux premiers stades de développement, consisterait à devenir riche.

Nous nous proposons dans le cadre du premier chapitre de notre travail de thèse d'effectuer une méta-analyse des recherches empiriques qui ont étudié la relation entre la croissance des revenus et la qualité de l'environnement.

Rappelons que depuis son émergence, l'hypothèse EKC a fait l'objet de débats continus, en particulier dans un passé récent. De nombreux chercheurs ont étudié sa validité pour différents pays et régions. Cependant, la question de sa validité empirique reste ambiguë. Les études menées ont utilisé des méthodologies, des ensembles de données et des indicateurs de dommages environnementaux différents et ont donné un large éventail de résultats contradictoires (Li et al. 2007 ; Ahmad et Long 2012).

Environ 57 % de la littérature confirme la validité empirique des hypothèses de l'EKC (Dinda et Coondoo 2006 ; Tamazian et al. 2009 ; Shahbaz et al. 2012 ; Tiwari et al. 2013 ; Farhani et al. 2014 ; Apergis et Ozturk 2015 ; Moutinho et al. 2017 ; Pata 2018, etc.).

A l’opposé, il existe également diverses études (43% de la littérature) qui ont trouvé une relation nulle ou très faible entre environnement et croissance économique. Ces études s'opposent à toute implication politique issue de l’existence d’une EKC (Pao et al. 2011 ; Begum et al. 2015 ; Jebli et Youssef 2015 ; Al Mulali et al. 2016 ; Dogan et Turkekul 2016 ; Liu et al. 2017, etc.)

La littérature empirique sur les hypothèses de l'EKC donne des résultats mitigés et soulève des controverses quant à savoir si elle peut être utilisée pour des recommandations de politique économique. La partie de la littérature qui valide son existence, tire des conclusions selon lesquelles la société peut couvrir la plupart des problèmes environnementaux avec la croissance du revenu (Dinda et Coondoo 2006) tandis que des études incluant Selden et al. (1999) ; Pao et al. (2011) ; et Liu et al. (2017) s'opposent à l'utilisation de l'EKC comme un cadre pour la formulation de politiques environnementales. Les controverses mentionnées soulèvent des incertitudes et remettent en question la fiabilité des résultats. Comme les deux courants de la littérature utilisent des outils et des techniques différentes, et cela pourrait être la principale raison des résultats contradictoires. De nombreuses études qui rejettent les hypothèses de l'EKC sont basées sur l'analyse d'un seul pays (Pao et al. 2011 ; Begum et al. 2015 ; Zambrano et al. 2018). De la même manière, les résultats obtenus avec des techniques économétriques différentes donnent des résultats différents. Ainsi, ces critiques laissent place à une vérification plus approfondie de la littérature existante au niveau agrégé. Une enquête détaillée est donc nécessaire pour explorer ce qui a été réalisé par les recherches passées et ce qui reste à faire.

Cavlovic et al. (2000) ont réalisé la première méta-analyse pour l'EKC afin de synthétiser la littérature. En utilisant la méthode des moindres carrés généralisés, ils ont

constaté que les résultats sont sensibles à la sélection de la méthodologie et des types de polluants.

Li et al. (2007) ont examiné une base de données relativement importante de 78 études et ont effectué une deuxième méta-analyse. Ils ont constaté qu'il n'y a pas de relation monotone décroissante entre la croissance des revenus et l'environnement. Ces résultats renforcent les doutes sur la possibilité de l'EKC d'avoir des implications politiques.

Mais les résultats de Li et al. (2007) peuvent souffrir d'un manque de fiabilité car ils présentent plusieurs faiblesses méthodologiques. Premièrement, le nombre d'études qu'ils ont examinées ne couvre pas la majeure partie de la littérature puisque la fréquence des études est beaucoup plus élevée dans le passé récent. Deuxièmement, aucun test de pré-estimation et de post-estimation n'a été employé pour valider leurs résultats.

Afin de combler ces lacunes, et dans le prolongement des travaux précédents, l'objectif de notre étude est d'examiner la littérature empirique, d'en synthétiser les résultats et d'en tirer des conclusions économiquement significatives en faisant une méta-analyse.

La présente méta-analyse qui a examiné 101 articles de recherche qui étaient publiés entre 2006 et 2019, contribue à la littérature sous deux aspects.

Premièrement, à la suite des travaux de Moher et al. (2009), notre étude mobilise un nouveau cadre : Preferred Reporting Items for Meta Regression Analysis (PRIMRA), qui est une extension de Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis (PRISMA).

Deuxièmement, cette étude consiste en un examen quantitatif de la littérature sur l'EKC, ce qui élimine les doutes sur sa validité. Les résultats de l'étude identifient comment l'EKC pourrait affectée par le choix des variables de contrôle et des méthodologies.

D’autre part, notre étude fait appel à des tests économétriques de pré-estimation pour sélectionner le modèle et à des tests économétriques de post-estimation pour valider la fiabilité des résultats quant à l’existence ou pas de l’EKC.

Bien que les résultats montrent certaines différences selon le choix des indicateurs de dégradation de l'environnement, il a été constaté que cette relation est un phénomène de long terme qui montre une grande robustesse aux choix des outils économétriques employés ou des types de données utilisées.

Les résultats de cette étude devraient contribuer aux recherches futures sur le lien entre la croissance économique et la qualité de l'environnement, et pourraient servir aux décideurs politiques pour mener des politiques publiques.

Dans le cadre d’un deuxième chapitre, nous examinerons empiriquement l’hypothèse de la courbe de Kuznets (EKC) au sein des pays de l’union européenne. Nous avons fait appel à l’empreinte écologique comme mesure de la dégradation de l’environnement, qui est un indicateur plus large qui prend en compte l’ensemble des facteurs responsables de la dégradation de l’environnement. Afin d’analyser la relation entre l’environnement approximé par l’empreinte écologique et la croissance économique au sein de 22 pays de l’Union européenne de 1995 à 2015, nous intégrons dans l’équation de régression deux variables : la consommation d’énergie et la croissance démographique.

Les études empiriques qui ont testé la validité de la courbe de Kuznets environnementale ont proposé plusieurs indicateurs de la pollution environnementale, comme la pollution de l'air, la pollution de l'eau ou les déchets biologiques. La plupart de ces études mesurent également la pollution environnementale en fonction des émissions de gaz anthropogéniques (Destek et Sarkodie 2019). Mais, comme la dégradation de

l'environnement n’est pas un phénomène unidimensionnel (Wackernagel et Rees 1998 ; Saqib et Benhmad 2021), les mesures de l’impact environnemental basées sur un seul indicateur risquent d’aboutir à des résultats empiriques incomplets ou erronés. Il est donc impératif d'utiliser un indicateur susceptible de prendre en compte tous les aspects de la dégradation de l'environnement. L'empreinte écologique (EF) peut jouer ce rôle puisqu’elle permet de mesurer l’impact de l’Homme sur son environnement. Il s’agit d’une méthode calcul capable d’estimer les quantités de terre, d’eau, de forêts et d’autres ressources naturelles qui permettent la consommation et l’absorption des déchets produits par un individu ou une population.

Le but ultime du calcul de l’empreinte écologique consiste à estimer l’impact de l’activité humaine sur l’environnement afin d’évaluer la durabilité de notre mode de vie actuel compte tenu de la disponibilité des ressources naturelle sur notre planète.

Notre analyse empirique de l’EKC s'inscrit dans le prolongement de la méta-analyse de Saqib et Benhmad (2021) qui a montré que l'existence de la courbe de Kuznets environnementale est sensible aux indicateurs de pollution environnementale.

Nos travaux contribuent à la littérature à deux égards. Premièrement, il s'agit d’une tentative d'utiliser la FE comme indicateur de la pollution environnementale dans la région européenne. Deuxièmement, contrairement à la littérature précédente, nous avons pris en compte le problème de la dépendance transversale généralement observé dans les données de panel afin de donner plus de robustesse à nos résultats.

Nos résultats empiriques ont révélé l’existence d’une relation quadratique entre la croissance des revenus et l'empreinte écologique et confirment donc la validité de l'EKC. Par conséquent, les politiques dont l’objectif consiste à assurer la durabilité de

l’environnement doivent limiter les émissions anthropiques, lutter contre la déforestation et contre la pollution de l’eau.

Enfin, et dans le cadre du chapitre 3, nous nous assignons comme objectif d’analyser le rôle des énergies renouvelables dans la réalisation de l’objectif de neutralité carbone à l’horizon 2050 au sein de l’Union européenne. En effet, cet objectif ambitieux qui s’est assigné ne peut être réalisé que par une installation massive des énergies renouvelables, en particulier de l’éolien et du solaire photovoltaïque et par un abandon des énergies fossiles.

Notre analyse empirique explore le rôle potentiel que peut jouer le déploiement des énergies renouvelables dans la réduction des émissions carbone au sein de l’Union européen, en particulier dans le cadre du pacte vert européen « Green deal » qui consiste en une baisse de ces émissions de 55% par rapport à leur niveau de 1990 ou Fit for 55.

Rappelons que l'accord de Paris de 2015 a mis l’accent sur la décarbonisation du secteur de l'énergie qui constitue le principal responsable des émissions de carbone. Bien que les mesures qui pourraient jouer un rôle dans la réduction des émissions restent largement suffisantes, la transition des énergies thermiques conventionnelles vers des énergies renouvelables constitue une option à explorer (Moutinho et al. 2015 ; Ari et Yikmaz 2019 ; IRENA 2020).

Mais, Cette transition ne peut pas se dérouler sans difficultés en particulier au niveau des industries énergivores (l'acier, le ciment, la chimie et l'aluminium, et autres) et des transports (le fret routier, le transport aérien et le transport maritime).

Toutefois, la réduction lente et régulière des coûts des énergies renouvelables au cours des deux dernières décennies (IRENA 2020) ont permis aux énergies renouvelables

devenir la source dominante de la production d'électricité dans le monde. Ainsi, un niveau record d'électricité (260 gigawatts) a été produit à partir de sources renouvelables en 2020 ; ce qui représente plus de quatre fois l'électricité produite à partir de toutes les autres sources d'énergie y compris fossiles.

Ceci d'autant plus que des innovations importantes ont été introduites dans les domaines du stockage des batteries, de la mobilité électrique et des technologies numériques. En outre, l'installation de mini et super-réseaux intelligents (micro et smart-gris) améliore la capacité des systèmes électriques à faire face à l'intermittence des énergies renouvelables, et facilite donc leur intégration. Enfin, les énergies renouvelables que constituent l'hydrogène vert et la bioénergie deviennent des solutions aux besoins en énergie nécessaires à la mobilité et aux bâtiments.

Les énergies renouvelables constituent donc une opportunité très prometteuse pour réaliser l'objectif d'une décarbonisation du secteur énergétique mondial (IRENA 2021). Leur utilisation à une large échelle a déjà permis dans une certaine mesure de stabiliser la croissance des émissions carbone dans le secteur de l'énergie. Ce qui conforte l'Agence internationale de l'énergie (IEA) dans son espoir que la part des énergies renouvelables atteindra deux tiers de l'approvisionnement énergétique d'ici 2050.

Mais, une question particulièrement importante consiste à savoir si la transition vers des technologies énergétiques propres et vertes (énergies renouvelables) permettra ou non de dissocier la croissance économique des émissions de carbone. L'Agence internationale de l'énergie affirme que les récents efforts de promotion du développement durable, en particulier la transition énergétique contribuent à réduire les émissions carbones. Cependant, les preuves disponibles ne permettent pas d'affirmer que la réduction des émissions de carbone est uniquement le résultat du déploiement des

énergies renouvelables ou qu'elle est également due à d'autres facteurs. À cet égard, il est indispensable d'étudier séparément l'impact du déploiement des énergies renouvelables et la réduction de la part des énergies fossiles.

L'objectif de cette étude est d'examiner empiriquement le potentiel des sources d'énergie renouvelables dans la réduction des émissions de carbone dans les États membres de l'Europe. L'Union européenne est considérée comme la première région économiquement intégrée au monde et s'est engagée à atteindre l'objectif de zéro émission nette de carbone. L'accord vert européen prévoit une réduction de 50 à 55 % des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030 par rapport au niveau de 1990 et une émission nette nulle d'ici 2050. Il vise à augmenter la part des énergies renouvelables jusqu'à 40% et à améliorer l'efficacité énergétique jusqu'à 36-39%. À cette fin, nous avons utilisé des données de panel pour 25 États membres de l'UE, allant de 1995 à 2019, pour mener notre analyse. Cette étude s'inscrit dans la continuité de celle de Saqib et Benhmad (2021b) qui ont étudié la courbe de Kuznets environnementale standard pour les pays européens. Ils ont trouvé que l'EKC tient pour les pays européens et que la consommation extensive d'énergie conduit à la pollution environnementale. Ils ont suggéré l'adoption de technologies d'énergie renouvelable pour réduire les émissions. C'est pourquoi, dans cette étude, nous avons fait la distinction entre les énergies renouvelables et les énergies fossiles afin d'examiner leurs impacts individuellement.

En désagrégeant la consommation d'énergie en énergie fossile et en énergie renouvelable, nous avons constaté que les énergies renouvelables ont un potentiel significatif dans la réduction des émissions de carbone à long terme. L'augmentation moyenne de la part des énergies renouvelables par an est de 1,61% et la baisse moyenne des émissions de carbone est de 0,62% durant la période historique analysée. D'autre part, l'énergie fossile est significative à la fois à court et à long terme avec une magnitude

relativement plus importante. Les résultats de l'étude montrent que les objectifs de pacte vert européen peuvent être atteints grâce à des initiatives fortes visant à remplacer les énergies fossiles par des énergies renouvelables. Un abandon complet de la consommation de charbon et des investissements dans la production d'énergie solaire photovoltaïque et éolienne seront nécessaires.

# Chapitre 1

## Une méta-analyse de la courbe de Kuznets environnementale

## 1. Introduction :

La courbe de Kuznets environnementale (EKC) a fait l'objet de nombreux débats et a été fréquemment citée dans la littérature depuis trois décennies. La courbe de Kuznets environnementale explique comment les activités économiques affectent la qualité de l'environnement à court et à long terme. L'EKC trouve son origine dans les travaux précurseurs de Grossman et Krueger (1991), qui ont trouvé une relation en forme de U inversé entre le $SO_2$ et le revenu par habitant. Au début, jusqu'à un point d'inflexion du revenu (ITP désormais), la croissance économique peut nécessiter une utilisation excessive des ressources, notamment de l'énergie, associée à la déforestation (khan et al. 2019), ce qui entraîne une pollution. Mais au-delà de ce point, la qualité de l'environnement s'améliore avec l'augmentation du revenu (Grossman et Krueger 1995 ; Selden et Song 1994 ; Harbaugh et al. 2002). Cette relation entre la qualité de l'environnement et la croissance du revenu par habitant est même de nature quadratique (Panayotou 1993 ; Destek et Sarkodie 2019). Les pouvoir publiques doivent alors considérer les implications politiques de cette relation. Cependant, cette théorie ne peut pas être appliquée pour tous les types de polluants et d'effets environnementaux (Stern 2003). D'autre part, certains facteurs comme le développement financier, les investissements directs étrangers, la population, le commerce international et le développement technologique peuvent affecter l'environnement à court et à long terme.

Depuis sa création, l'EKC a fait l'objet d'un débat continu, en particulier dans un passé récent. De nombreux chercheurs ont étudié sa validité pour différents pays et régions. Cependant, la question de sa validité empirique reste ambiguë. En effet les études empiriques menées ont utilisé des méthodologies, des ensembles de données et des

indicateurs de dommages environnementaux différents et ont donné un large éventail de résultats contradictoires (Li et al. 2007 ; Ahmad et Long 2012).

Plusieurs études (Environ 57 % de la littérature) confirme la validité empirique des hypothèses de l'EKC (voir par exemple Dinda et Coondoo 2006 ; Tamazian et al. 2009 ; Shahbaz et al. 2012 ; Tiwari et al. 2013 ; Farhani et al. 2014 ; Apergis et Ozturk 2015 ; Moutinho et al. 2017 ; Pata 2018 ; etc. Au contraire, il existe également diverses études (43% de la littérature) qui ont trouvé une relation très faible s'opposent à l'EKC et toute implication politique qui en découle (Pao et al. 2011 ; Begum et al. 2015 ; Jebli et Youssef 2015 ; Al Mulali et al. 2016 ; Dogan et Turkekul 2016 ; Liu et al. 2017 ; etc.)

La littérature empirique sur les hypothèses de l'EKC donne donc des résultats mitigés et soulève des controverses quant à savoir si elle peut être utilisée pour des implications politiques ou non ?

La partie de la littérature qui valide son existence, tire des conclusions selon lesquelles la société peut couvrir la plupart des problèmes environnementaux avec la croissance du revenu (Dinda et Coondoo 2006). Cependant que des études incluant Selden et al. (1999) ; Pao et al. (2011) ; et Liu et al. (2017) s'opposent à l'interprétation de l'EKC comme une base pour la formulation de politiques environnementales. Les controverses susmentionnées soulèvent des incertitudes et remettent en question la fiabilité des résultats. Comme les deux courants de la littérature utilisent des outils et des méthodes économétriques différentes, et cela pourrait être la principale raison des résultats contradictoires. En effet de nombreuses études qui rejettent les hypothèses de l'EKC sont basées sur l'analyse d'un seul pays (Pao et al. 2011 ; Begum et al. 2015 ; Zambrano et al. 2018). Ainsi, ces critiques plaident en faveur d'une vérification plus approfondie de la littérature existante. Une enquête détaillée est nécessaire pour explorer ce qui a été

réalisé par les recherches passées et ce qui reste à faire. Cette enquête se fera dans le cadre d'une méta-analyse.

Cavlovic et al. (2000) ont réalisé la première méta-analyse pour l'EKC afin de synthétiser la littérature et de prévoir de nouveau point d'inflexion de revenu (ou bien Income Turning Point (ITP)). En utilisant la méthode des moindres carrés généralisés, ils ont constaté que les résultats sont sensibles à la sélection de la méthodologie et des types de polluants. Dans le prolongement des travaux précédents, Li et al. (2007) ont examiné une base de données relativement importante de 78 études et ont effectué une deuxième méta-analyse. Ils ont constaté qu'il n'y a pas de relation monotone décroissante entre la croissance des revenus par habitant et l'environnement, ce qui peut servir de base à l'existence d'une EKC. Ces résultats accentuent les doutes sur l'utilisation de l'EKC pour en tirer des conclusions politiques.

Toutefois il faut noter que les résultats de Li et al. (2007) ne sont pas fiables car ils présentent plusieurs faiblesses méthodologiques. Premièrement, le nombre d'études qu'ils ont examinées ne couvre pas la majeure partie de la littérature. En effet, la fréquence des études a été plus élevée dans le passé récent. Deuxièmement, aucun test de pré-estimation et de post-estimation n'a été employé pour valider leurs résultats. Ainsi, et afin de combler ces lacunes, une enquête plus détaillée et plus précise est nécessaire pour déterminer si la théorie de l'EKC est un mythe ou une réalité.

Dans le prolongement des travaux précédents, l'objectif de notre étude est d'examiner les variations systématiques entre les résultats existants. Pour cela, elle vise à effectuer une méta-analyse de régression à un large niveau. L'étude vise à synthétiser les résultats antérieurs de la littérature et à tirer des conclusions économiquement significatives. Il

s'agit d'une étude dans le domaine de l'EKC qui couvre un grand nombre d'articles publiés entre 2006 et 2019 et utilise des outils quantitatifs adaptés pour l'analyse.

La présente étude contribue à la littérature sous deux aspects :

- Premièrement, à la suite de Moher et al. (2009), l'étude introduit un nouveau cadre, Preferred Reporting Items for Meta Regression Analysis (PRIMRA), qui devrait aider les chercheurs à l'avenir lors de la réalisation de méta-analyses et d'examens quantitatifs. Le cadre PRIMRA est une extension de Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis (PRISMA) et illustre cinq étapes simples sur la stratégie empirique pour mener une méta-analyse. La partie méthodologique de cette étude a été menée dans ce cadre.
- Deuxièmement, dans la plupart des cas, les enquêtes quantitatives sont préférées aux enquêtes descriptives et qualitatives. Ainsi, cette étude est un examen quantitatif de la littérature sur l'EKC, ce qui élimine les doutes sur sa validité.

Les résultats sur l'existence de l'EKC sont affectés par le choix de la variable de contrôle et le choix méthodologique. Ainsi, L'utilisation de tests économétriques de pré-estimation pour sélectionner le modèle et de tests économétriques de post-estimation pour valider la fiabilité des résultats permettra de relever ce défi. Les résultats de cette étude devraient contribuer aux recherches futures, en particulier, dans le même domaine du lien entre la croissance économique et la qualité de l'environnement. Les chercheurs universitaires ainsi que les décideurs politiques peuvent également bénéficier des résultats de cette étude.

## 2. Analyse de méta régression

La méta-analyse est une approche statistique qui modélise la littérature empirique pertinente qui apparaît comme des observations dans l'ensemble des données (Li et al.

2007). Il s'agit d'une méthode formelle permettant de mélanger les résultats d'études empiriques identiques et de mettre en lumière la variation systématique des variables et des résultats (Cavlovic et al. 2000). L'objectif principal de la méta-analyse est de déduire des inférences significatives liées à la littérature. Quant à l'analyse de méta-régression, c'est une extension de la méta-analyse qui cherche à savoir dans quelle mesure la disparité statistique entre les études peut être liée à des caractéristiques communes (Thompson et Higgins 2002). L'analyse de méta-régression permet « d'analyser l'analyse » au lieu de se fier aux résultats des études individuelles. Les études sont objectivement collectées à partir de la littérature connexe, mais seules certaines variables de réponse et statistiques sommaires sont choisies subjectivement. Le principal avantage de cette méthodologie est la large couverture de l'analyse basée sur les outils statistiques et les tests d'hypothèses. En revanche, il existe une petite possibilité de biais de sélection et de fluctuations essentielles entre les études de l'échantillon qui peuvent ne pas être conformes à une catégorisation simple. En outre, seules les études quantitatives peuvent être prises en considération, et non les études qualitatives. En effet, les études qualitatives ne peuvent pas être utilisées pour recueillir des données.

## 3. Preferred Reporting Items for Meta Regression Analysis

Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analysis (PRISMA), Est un cadre élaboré par Moher et al. (2009). Ce cadre vise à aider les chercheurs et les praticiens à produire des revues améliorées et plus attrayantes. Le PRISMA a été fréquemment utilisé pour les revues de littérature systématiques d'études publiées. Il fournit quelques étapes utiles afin de mener des revues de littérature de qualité. À la suite de Moher et al. (2009), nous avons développé un cadre similaire appelé Preferred Reporting Items for Meta Regression Analysis (PRIMRA) qui devrait faciliter l'aspect

quantitatif des méta-analyses. Ce cadre est une extension de PRISMA et fournit des lignes directrices pour mener des méta-analyses quantitatives.

**Figure 1.1: Preferred Reporting Items for Meta Regression Analysis (PRIMRA)**

| **Step 1: Identifying Literature** | | | |
|---|---|---|---|
| **Identification** | **Screening** | **Eligibility** | **Included** |
| Web of Science, PubMed, Google search | Thoroughly read abstracts and Removed duplicate | Theoretical studies dropped and empirical studies downloaded | Studied all papers in detail and included if found relevant |

| **Step 2: Determining Variables** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Dependent Variable** | **Independent Variables** | | | |
| IMPACT | Data | Control | Methodology | Env. Indicators |

**Step 3: Identifying Individual Observations**

- ❖ Each study is considered as a unit and not limited to only one observation
- ❖ Total number of studies included are 101.
- ❖ Total number of observations extracted are 504.

| **Step 4: Data Coding and Extraction** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Dependent Variable** | **Independent Variables** | | | |
| **IMPACT** | **Data** | **Control** | **Methodology** | **Env. Indicators** |
| Improve = 1<br>Degrade = 2<br>None = 3 | Time = Real<br>OBS = Real<br>Panel = (0,1)<br>CC = (0,1)<br>Income= (0,1)<br>Emission = (0,1) | GDP = (0,1)<br>TR = (0,1)<br>EC = (0,1)<br>POP = (0,1)<br>FD = (0,1)<br>FDI = (0,1)<br>INST = (0,1) | 1) METH<br>ARDL = 1<br>GMM = 2<br>FM/DOLS = 3<br>MG/PMG = 4<br>Other = 5<br>2) SIG<br>JJ = 1<br>Pedroni = 2<br>D-H = 3<br>VECM = 4<br>Other = 5<br>3) Test = (0,1) | 1) Eco Bio<br>Anthro = 1<br>Chemical = 2<br>Eco Bio= 3 |

| **Step 5: Estimation Approach and Execution** | | |
|---|---|---|
| **Model Selection** | **Model Estimation** | **Results Validity** |
| Likelihood Ratio Test | Multinomial Logistic Regression | Wald Test,<br>Hausman and McFadden Test |

PRIMRA comprend cinq étapes et vise à aider les chercheurs et les praticiens à effectuer des analyses plus attrayantes et plus complètes de la littérature. La figure 1.1 illustre brièvement les cinq étapes de ce cadre. Les cinq étapes de PRIMRA :

### 3.1.Identifier la littérature

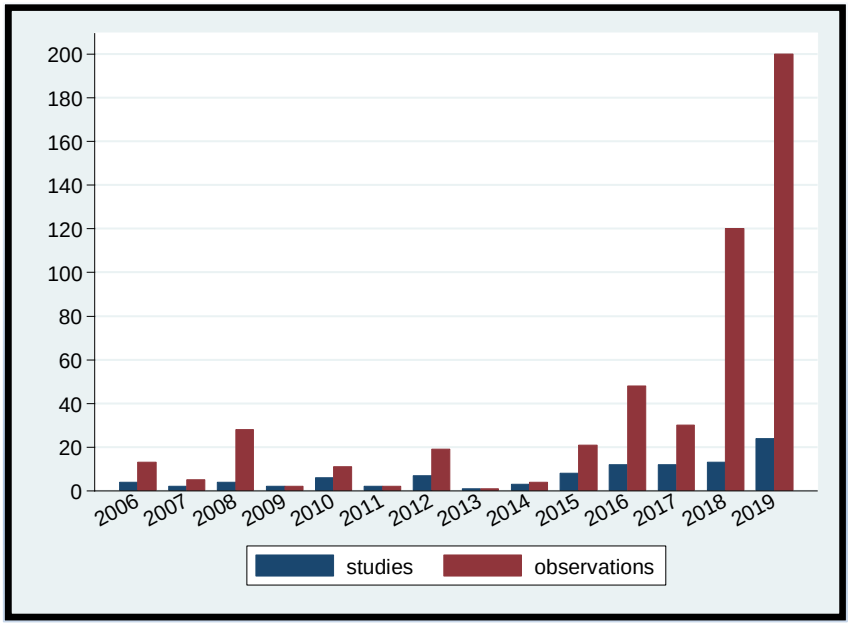
La première étape comprend l'ensemble du processus PRISMA, de l'identification à l'inclusion des études subjectives. La recherche de la littérature pertinente est considérée comme l'étape la plus longue de tout le processus (Sebri 2015). L'EKC est apparu il y a trente ans, mais la fréquence des publications a augmenté au cours de la dernière décennie et surtout au cours des cinq dernières années.

D'autre part, Li et al. (2007) ont examiné des études de 1992 à 2005. C'est pourquoi nous avons considéré la période allant de 2006 jusqu'à 2019. Conformément à la méthodologie de Sarkodie et Strezov (2019), les études publiées dans des revues évalués par des pairs ont été recherchées sur le Web of Science, PubMed et dans la recherche générale sur Google. Les articles inclus dans l'étude sont principalement publiés dans Elsevier, Springer, Taylor & Francis et Wiley online. Sarkodie et Strezov (2019) affirment qu'il faut définir des mots-clés et des délais précis pour la recherche documentaire. Ainsi, pour rechercher la littérature ciblée, nous avons utilisé des mots-clés tels que courbe de Kuznets environnementale, croissance des revenus et émission, croissance économique et émission de $CO_2$, croissance économique et qualité environnementale, points de retournement des revenus, EKC et point de retournement.

Au départ, 213 articles de PubMed et 475 articles du Web of Science ont été trouvés, avec quelques ajouts provenant de la recherche générale sur Google (la majorité d'entre eux étaient communs). Dans un premier temps, leurs résumés ont été examinés et, s'ils étaient pertinents, ils ont été téléchargés et étudiés en détail. Seules les études réalisées pour la validation empirique de l'EKC ont été incluses car les études théoriques ne peuvent pas être utilisées pour extraire des données pour les différentes variables utilisées dans notre analyse. Finalement, il ne reste que 101 études qui remplissent

l'ensemble des critères que nous avons sélectionnés. Les fréquences des études par année sont présentées dans la figure 1.2.

**Figure 1.2: Répartition annuelle des études et des observations**




La taille totale de l'échantillon fournit 504 observations et est expliquée en détail sur les critères de sélection présentés suivante. Notre étude vise à fournir un ensemble de données plus détaillé et plus complet que celui de la littérature (25 articles de recherche de Cavlovic et al. 2000 ; 77 de Li et al. 2007 et 40 de Sebri 2015).

### 3.2.Déterminer les variables

La sélection des variables est en fait la tâche la plus difficile de tout ce processus. Le plus grand soin a été apporté à la sélection, en particulier à la manière de les mesurer, afin de formuler une base de données plus convaincante. Cette étude suit celle de Li et al. (2007), donc certaines variables sont prises et définies de la même manière. Mais des changements majeurs sont apportés, notamment dans la mesure et la catégorisation des variables. La liste détaillée des variables avec les statistiques descriptives est présentée dans le tableau 1.1.

**Tableau 1.1. Variables et statistiques descriptives**

| Variables | Descriptions | Observations | Mean (std.dev) |
|---|---|---|---|
| **IMPACT** | Indicator variable of income-environment nexus. If the observation supports monotonically decreasing trend or inverted U-shape (Improve), then = 1(288 observations), if supports monotonic increasing or U-shaped relation (Worsen), then = 2 (132 observations), if insignificant or no relation (None), then = 3 (84 observations). | 504 | 1.595 (.758) |
| | ***Data Related*** | | |
| **ln*OBS*** | Logarithm of the number of total observations | 504 | 4.176 (1.335) |
| **ln*T*** | Logarithm of time period for each observation | 504 | 3.459 (.644) |
| **PANEL** | If the panel data set is used, then = 1 (134 observations), otherwise, time series = 0 | 504 | .265 (.442) |
| **CC** | If the analyses are done for cross country data, then = 1 (95 observations), otherwise for single country = 0 | 504 | .188 (.391) |
| **INCOME** | If the study is conducted for high- or middle-income country/ies, then = 1 (394 observations), otherwise for lower or lower middle income = 0 | 504 | .781 (.413) |
| **EMISSION** | If the study uses toxic emission as measurement of pollution, then = 1 (466 observations), otherwise = 0 | 504 | .924 (.264) |
| | ***Control Variables*** | | |
| **GDP** | If the study uses GDP/GDP per capita as a measurement of income, then = 1 (493 observations), otherwise = 0 | 504 | .978 (.146) |
| **TRADE** | If the study uses trade as explanatory variable, then = 1 (130 observations), otherwise = 0 | 504 | .257 (.437) |
| **POP** | If the study uses population as explanatory variable, then = 1 (141 observations), otherwise = 0 | 504 | .279 (.449) |
| **EC** | If the study uses energy consumption as explanatory variable, then = 1 (242 observations), otherwise = 0 | 504 | .480 (.500) |
| **FD** | If the study uses financial development as explanatory variable, then = 1 (83 observations), otherwise = 0 | 504 | .164 (.371) |
| **FDI** | If the study uses foreign direct investment as explanatory variable, then = 1 (12 observations), otherwise = 0 | 504 | .023 (.152) |
| **INST** | If the study uses institutional development as explanatory variable, then = 1 (11 observations), otherwise = 0 | 504 | .021 (.146) |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | ***Methodology*** | | |
| **METH** | If the study uses ARDL, then = 1 (44 observations), If it uses GMM, then = 2 (31 observations), If it uses FM/DOLS, then = 3 (111 observations), If it uses MG/PMG, then = 4 (73 observations), or if it uses any other than above four, then = 5 (245 observations). | 504 | 3.853 (1.326) |
| **SIG** | If the study uses Johansen co integration (JJ), then = 1 (13 observations), If it uses Pedroni cointegration (Pedroni), then = 2 (56 observations), If it uses Dumitrescu and Hurlin non-causality (D-H), then = 3 (19 observations), If it uses Vector error correction (VECM), then = 4 (122 observations), and if no test has been applied (Other), then = 5 (294 observations). | 504 | 4.293 (1.123) |
| **TEST** | If any robustness test is applied for validating results, then = 1 (179 observations), otherwise = 0 | 504 | .355 (.479) |
| | ***Environmental Indicators*** | | |
| **INDIC** | If the environmental pollution is measured as anthropogenic (ANTHRO) gases like $CO_2$, $CH_4$, $N_2O$, then = 1 (450 observations), If it is measured as chemical gas (CHEM) like $SO_2$, then = 2 (24 observations), If it is measured as biological related pollutants like industrial waste or ecological including deforestation (Bio-Eco), then = 3 (30 observations). | 504 | 1.166 (.508) |

Sur la base du comportement des coefficients bêta (β), selon le comportement de « β », ce le lien entre le revenu par habitant et la qualité de l'environnement peut être regroupé en sept catégories :

(1) Augmentation monotone,

(2) Diminution monotone,

(3) Relation EKC réelle,

(4) EKC inverse,

(5) Relation cubique,

(6) Relation non significative,

(7) Aucune.

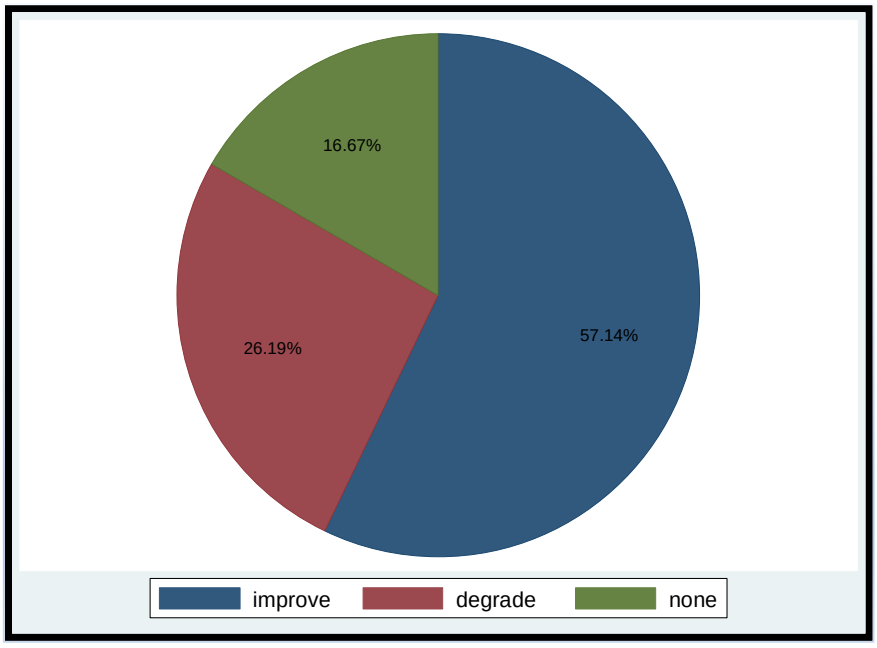
Une relation non significative signifie que le coefficient bêta (β) estimé apparaît de manière non significative avec des signes cohérents pour un EKC. Tandis qu'aucune ne fait référence à une relation significative ou non significative.

En résumé, ces catégories peuvent être résumées comme suit : « amélioration » ou « détérioration ».

« L'amélioration » fait référence à une relation significative monotone décroissante et en forme de U inversé, ce qui signifie que la croissance économique entraîne une amélioration de la qualité de l'environnement. Alors que les relations monotones significativement croissantes, en forme de « U » ou de « N » ont été classées dans la catégorie « détérioration ». Cela signifie que l'environnement se détériore avec la croissance économique.

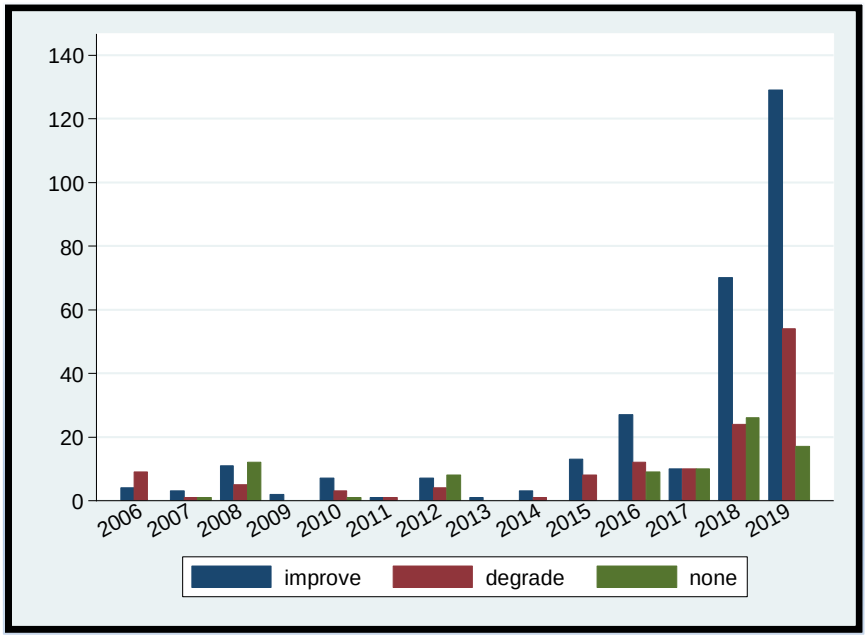
Toutes les autres possibilités (paramètres non significatifs ou absence de relation) sont regroupées sous l'appellation « aucune ».

**Figure 1.3: Distribution par catégorie de toutes les observations**



La variable catégorielle dépendante est donc trichotomique et s'appelle « IMPACT ». La figure 1.3 illustre le pourcentage d'études qui tombent dans l'une ou l'autre catégorie tandis que la figure 1.4 illustre la fréquence annuelle de ces catégories rapportées par la littérature. Notons que plus de la moitié des études valide L'EKC.

**Figure 1.4: Répartition des catégories par année**




Les variables indépendantes sont divisées en quatre groupes : les variables liées aux données, les variables de contrôle, la méthodologie et les indicateurs environnementaux. Le groupe lié aux données comprend différentes caractéristiques telles que la période (lnT), le nombre d'observations (lnOBS), les séries chronologiques ou les données de panel (PANEL), et l'analyse d'un seul pays ou d'un pays croisé (cross-country (CC)). Soit l'étude a été menée pour des pays à haut revenu (INCOME) ou à plus faible revenu. Et soit la pollution environnementale a été mesurée en tant qu'EMISSION ou autre chose. La période et le nombre d'observations sont des variables réelles qui apparaissent sous forme de logarithme naturel tandis que les quatre autres sont des variables muettes.

Les variables de contrôle sont celles qui sont utilisées comme variables explicatives dans chaque observation pour l'estimation de l'EKC. La sélection a été faite sur la base des variables les plus fréquemment utilisées dans la littérature et qui jouent un rôle significatif dans l'existence ou l'absence de l'EKC. Elle comprend 7 variables qui apparaissent toutes comme des variables muettes. Il s'agit du PIB par habitant, du commerce international (TRADE), de la consommation d'énergie (EC), de la croissance démographique (POP), du développement financier (FD), des investissements directs étrangers (FDI) et du développement institutionnel (INST). La variable PIB est la variable clé qui joue un rôle important dans l'existence ou la non-existence de l'EKC.

Les variables méthodologiques sont celles qui expliquent le type d'outils statistiques ou économétriques utilisés pour l'estimation, comme le modèle autorégressif à retards distribués (ARDL), la méthode généralisée des moments (GMM), le groupe moyen et le groupe moyen groupé (MG/PMG), les moindres carrés ordinaires dynamiques et entièrement modifiés (DOLS/FMOLS) ou toute autre technique (comme l'auto régression vectorielle (VAR), la régression quantile, la causalité à seuil, etc. qui apparaissent à moins de 5 % chacune dans l'ensemble des données). Cette variable est polychromique et a été nommée (METH). De la même manière, on applique ou non un test de cointégration à la Johansen ou la Pedroni, et des tests de causalité au sens de Granger comme la méthode de correction des erreurs vectorielles (VECM) ou Dumitrescu et Hurlin (DH). Enfin, si un test de robustesse (TEST) a été utilisé pour valider les résultats ou non. Une explication détaillée de chaque variable est présente dans les sections correspondantes du tableau 1.1.

Le dernier groupe comprend des variables indicatrices qui sont utilisées pour mesurer les dommages environnementaux. Cette catégorisation alternative des indicateurs environnementaux permet de différencier les différents types de pollutions. Par

exemple, les gaz anthropiques (ANTHRO) qui sont concernés par la pollution de l'air comprennent le $CO_2$, le $CH_4$, le $N_2O$ et le $SF_6$, bien que la littérature soit dominée par le $CO_2$. D'autre part, les gaz chimiquement actifs (CHEM) qui facilitent la formation d'autres gaz anthropiques et la pollution de l'eau par des interactions chimiques sont le $SO_2$. Alors que les indicateurs liés à la biologie, les déchets dangereux (industriels ou agricoles) et les indicateurs écologiques ont été mesurés séparément (Bio-Eco).

### 3.3.Identifier les observations individuelles

Après la sélection des variables, les observations de chaque étude sont identifiées. Chaque étude est considérée comme une unité et n'est pas limitée à une seule observation. Des efforts ont été faits pour extraire le maximum d'informations de chaque étude. Si l'étude est menée pour plus d'un polluant (Song et al. 2008 ; Farhani et al. 2014 ; Li et al. 2016 ; Armeanu et al. 2018) et que les résultats sont rapportés séparément, les résultats de chaque polluant sont considérés comme une observation distincte. De la même manière, diverses études comprennent des données en panel constitués de plusieurs pays (par exemple, Bilgili et al. 2016 ; Dong et al. 2018 ; Sarkodie et Strezvo 2018 ; Isik et al. 2019 ; Wang et al. 2019 ; etc.). Si une étude a présenté des résultats séparément pour chaque pays, alors chaque résultat a été considéré comme une observation. Quelques études ont également utilisé différentes méthodes économétriques, pour une analyse de robustesse, afin de vérifier la fiabilité des résultats (Li et al. 2016 ; Ali et al. 2017 ; Acar et al. 2018 ; Hao et al. 2018 ; Pata 2018 ; Lau et al. 2019). Si une étude a rapporté des résultats pour différentes techniques, chaque résultat a été considéré comme une observation distincte. La figure 1.4 donne une image de la taille de l'échantillon entier, composé de 504 observations. L'ensemble de données est plus complet et couvre des études presque deux fois plus nombreuses que celles de la littérature, et devrait donner des résultats plus fiables.

### 3.4. Codage et extraction des données

Des codes sont attribués à toutes les variables catégorielles ainsi qu'aux variables fictives. La variable dépendante (IMPACT) est trichotomique et se voit attribuer la valeur « 1 » pour IMPROVE (288 observations) qui comprend des résultats pour une diminution monotone significative ou une courbe en U inversé significative. Tandis que « 2 » est attribué à DEGRADE (132 observations) comprenant une augmentation monotone significative, une forme en « U » significative et une forme en N significative. Et « 3 » est affecté à NONE (84 observations) qui comprend toutes les autres possibilités comme l'absence de relation linéaire et quadratique, la décroissance insignifiante ou la forme en U insignifiante.

Dans les variables indépendantes, il n'y a que deux variables explicatives dans la catégorie des données (lnT et lnOBS), qui apparaissent sous forme de valeurs réelles. Le logarithme naturel a été utilisé pour minimiser les variations possibles entre les observations et éviter le problème des valeurs aberrantes. En ce qui concerne les variables muettes, la valeur « 1 » a été attribuée si l'étude utilise des données de panel (134 observations), sinon la valeur « 0 » pour les données de série chronologique (370 observations). De la même manière, si l'étude utilise des données pour plusieurs pays (95 observations), alors « 1 » sinon « 0 » pour un seul pays (409 observations). Si l'étude est menée pour un ou plusieurs pays à revenu moyen, moyen supérieur ou élevé (394 observations), alors « 1 » sinon « 0 » pour les pays à revenu moyen inférieur ou inférieur (110 observations). Le reste de toutes les variables de la catégorie de contrôle se voient attribuer « 1 » pour leur présence et « 0 » pour leur absence, comme indiqué dans le tableau 1.1 ci-dessus.

Les variables de la section méthodologie comprennent deux variables catégorielles et une variable muette. Les variables catégorielles pour la méthodologie économétrique (METH) comprennent cinq catégories, si l'étude utilise ARDL, alors = 1 (44 observations), si l'étude utilise GMM, alors = 2 (31 observations), si l'étude utilise FM/DOLS, alors = 3 (111 observations), si l'étude applique MG/PMG, alors = 4 (73 observations), ou si l'étude utilise toute autre méthode que les quatre ci-dessus, alors = 5 (245 observations). Il convient de noter que tous les codes attribués de 1 à 5 ne signifient pas un quelconque ratissage ou une supériorité/infériorité. Toutes les observations pour toutes les variables catégorielles sont traitées de manière égale avec le même poids. La variable catégorielle pour la cointégration ou la causalité (SIG) est également composée de cinq catégories. Si l'étude utilise la cointégration de Johansen (JJ), alors = 1 (13 observations), si la cointégration de Pedroni (Pedroni), alors = 2 (56 observations), si la non-causalité de Dumitrescu et Hurlin (D-H), alors = 3 (19 observations), si le VECM, alors = 4 (122 observations), et si aucun test de ce type n'a été appliqué (Autre), alors = 5 (294 observations). La seule variable muette dans cette catégorie est (TEST). Si un test de robustesse a été appliqué, alors = 1 (179 observations), sinon = 0 pour aucun.

Enfin, pour les dommages environnementaux, la variable de mesure (INDIC) est trichotomique. Si le dommage a été mesuré comme anthropique (ANTHRO), alors = 1 (450 observations), s'il a été mesuré comme gaz chimique (CHEM), alors = 2 (24 observations), s'il a été mesuré comme polluant lier à la biologie (Bio-Eco), alors = 3 (30 observations). Une fois encore, il convient de noter que tous les codes ont la même valeur et sont traités de la même manière en termes de pondération.

### 3.5. Méthode d'estimation et d'exécution

La dernière étape consiste à sélectionner une méthodologie statistique précise qui permet l'estimation du modèle. Il existe plusieurs méthodologies telles que le modèle linéaire généralisé, Probit, Logit et Tobit, etc. qui peuvent être appliquées en présence de variables qualitatives. Mais Long et Freese (2001) affirment que dans le cas d'une variable dépendante catégorielle, lorsque les alternatives sont dissemblables et ne se substituent pas les unes aux autres, la régression logistique multinomiale (MNL) est plus efficace. La MNL peut être utilisée dans le cas de plus de deux résultats possibles pour la variable dépendante avec des variables indépendantes dichotomiques fréquentes. Dans notre cas, nous avons trois catégories de la variable dépendante et complètement dissemblables les unes des autres. Il est donc plus approprié de faire appel à la régression MNL. Dans ce type de régression, les variables indépendantes peuvent apparaître sous forme continue, binaire et catégorique ou encore sous forme combinée. Le principal avantage de l'utilisation du modèle MNL est qu'il est facile et direct à interpréter, mais un peu compliqué car un grand nombre de paramètres sont traités simultanément (Cheng et Long 2007). La spécification du modèle MNL est donnée ci-dessous dans l'équation (1) ;

$$P\,(Y = j \mid C) = \frac{e^{(\beta_j \prime X_i)}}{\sum_{k=1}^{c} e^{(\beta_k \prime X_i)}} \qquad (1.1)$$

Ou, $i = 1 \ldots\ldots n$ et $c = 1 \ldots\ldots 3$

Dans l'équation ci-dessus, P ($Y = j \mid C$) est la probabilité que la variable dépendante (IMPACT) tombe avec ses alternatives dans l'ensemble de choix C = {Amélioration, détérioration et aucune} pour chaque observation i. « $X_i$ » est le vecteur de toutes les variables indépendantes tandis que « $\beta_j$ » et « $\beta_k$ » sont les vecteurs des coefficients correspondants à estimer. Dans notre cas, il y a 17 variables indépendantes et elles sont

classées en quatre groupes différents comme décrit dans le tableau 1.1. Les coefficients du modèle n'ont pas de signification économique directe, il faut donc calculer les effets marginaux des probabilités (Green 2003 ; p 722).

Pour éviter la perte de généralité, nous avons utilisé la troisième catégorie (Aucun) de la variable dépendante comme catégorie de référence et en considérant que la somme des probabilités de toutes les alternatives ou choix possibles soit égale à un (Sebri 2015). Par conséquent, équation (1.1) pour une catégorie de référence, où j = 3, peut être écrite comme suit ;

$$P\,(Y = 3) = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^{2} \mathrm{e}^{(\beta_k \prime X_i)}} \qquad (1.2)$$

Alors que pour la catégorie « non-Baseline », elle peut être écrite comme suit ;

$$P\,(Y = j) = \frac{\mathrm{e}^{(\beta_j \prime X_i)}}{1 + \sum_{k=1}^{2} \mathrm{e}^{(\beta_k \prime X_i)}} \qquad (1.3)$$

La régression MNL présente certains avantages, mais aussi des inconvénients qu'il convient de prendre en considération. Premièrement, le changement de la variable dépendante est interprété comme un changement relatif à la catégorie de base dû à un changement de la variable explicative. Ainsi, elle montre un changement relatif par rapport à un changement absolu (Sebri 2015). Lorsque la variable explicative apparaît également sous forme catégorielle, il devient plus difficile d'en retirer une signification économique directe (Green 2003), nous devons donc calculer les effets marginaux. Deuxièmement, de nombreuses variables sont traitées simultanément, il faut donc accorder plus d'attention à la vérification de la robustesse des résultats (Cheng et Long 2007). Troisièmement, il est difficile d'obtenir des résultats précis dans le cas où les alternatives de la variable dépendante sont des substituts. Pour cette raison, l'hypothèse d'indépendance des alternatives non pertinentes (IIA) doit être confirmée. Pour vérifier

la signification individuelle de chaque paramètre de l'équation (1.1), le test de Wald a été utilisé et est expliqué ci-dessous.

### 3.5.1. Test de Wald

Le test de Wald est une mesure statistique paramétrique permettant de confirmer si un ensemble de variables indépendantes est collectivement « significatif » pour un modèle ou non. Il est également utilisé pour confirmer si chaque variable indépendante d'un modèle est significative ou non.

Dans un modèle statistique représentant la relation entre des attributs de données, où les paramètres sont estimés à partir d'un échantillon, le test de Wald utilise l'estimation du paramètre par l'échantillon et une estimation de la variabilité pour tirer des conclusions sur la véritable valeur non observée du paramètre.

- Si le test de Wald montre que les paramètres de certaines variables explicatives sont nuls, nous pouvons supprimer ces variables du modèle.
- Si le test montre que les paramètres ne sont pas nuls, nous devons inclure les variables dans le modèle.

Le test de Wald peut être utilisé pour des modèles avec des variables dichotomiques et des modèles pour des variables continues. Le test de Wald est facile à calculer car il ne nécessite qu'un seul modèle à estimer. Il teste l'hypothèse nulle de paramètres égaux à zéro (Hosmer et al. 2013). Par exemple, l'acceptation de l'hypothèse nulle peut se traduire par la suppression de la variable spécifique qui ne peut pas affecter de manière significative l'efficacité du modèle.

L'équation (1.4) illustre la forme fonctionnelle du test de Wald ;

$$W = \frac{(\hat{\beta} - \beta_0)}{\mathrm{Var}\,(\hat{\beta})} \tag{1.4}$$

L'hypothèse nulle du test stipule que les deux coefficients d'intérêt sont simultanément égaux à zéro. Si le test accepte l'hypothèse nulle, cela suggère que la suppression des variables du modèle ne dégradera pas significativement l'ajustement de ce modèle.

Le test de Wald peut nous guider pour sélectionner le meilleur modèle en ajoutant ou en supprimant des variables dans le modèle, mais ses résultats sont parfois remis en question, notamment dans le cas de modèles complexes et d'un grand nombre de variables. Dans ce cas, nous nous référons au test du rapport de vraisemblance (LR) qui semble avoir une performance supérieure (Long et Freese 2001).

### 3.5.2. Test du rapport de vraisemblance

Le test LR compare la qualité de l'ajustement de deux modèles emboîtés suivant la distribution du chi-deux. Dans notre cas, bien que notre modèle soit linéaire, il y a trop de paramètres à estimer avec la combinaison de variables continues, dichotomiques et polychromiques.

Le test LR compare les rapports de vraisemblance du modèle non restreint par rapport au modèle restreint (MR). Pour ce faire, le test LR compare les logarithmes de vraisemblance des deux modèles. Si cette différence est statistiquement significative, on considère que le modèle le moins restrictif s'adapte significativement mieux aux données que le modèle le plus restrictif. Si les logarithmes de vraisemblance des modèles sont disponibles, le test LR est assez facile à calculer.

La forme fonctionnelle du test LR est la suivante ;

$$LR = -2ln(\frac{L(M_R)}{L(M_{UR})}) = 2\ (\text{loglikelihood}\ (M_{UR}) - \text{loglikelihood}\ (M_R)) \qquad (1.5)$$

Où « $M_{UR}$ » est un modèle non restreint et « $M_R$ » un modèle restreint. Le test LR suit la loi du chi-deux avec un degré de liberté égal au nombre de paramètres contraints.

L’hypothèse nulle du test indique que le modèle imbriqué ou restreint est plus efficace que le modèle non restreint. En cas de valeur de probabilité significative, nous rejetons l'hypothèse nulle et concluons que le modèle non restreint (ou le modèle avec de nombreuses variables explicatives) est efficace par rapport au modèle imbriqué/restrictif.

### 3.5.3. Test de Hausman (test de IIA)

Les modèles Logit multinomiaux sont valables sous l'hypothèse d'indépendance des alternatives non pertinentes (IIA). Cette hypothèse stipule que les rapports de cotes de toutes les alternatives disponibles sont indépendants les uns des autres et que l'inclusion ou l'exclusion de résultats n'affecte pas les cotes parmi les alternatives restantes (Green 2003 ; p 724). La violation de cette hypothèse rend le modèle compliqué et les estimations des paramètres ne sont pas plus fiables.

Afin de vérifier nos résultats, le test de Hausman développé par Hausman et McFadden (1984), a été utilisé. Long et Freese (2001) affirment que ce test donne parfois des résultats incohérents et n'est pas hautement recommandé, mais en l'absence d'alternative, nous pouvons appliquer ce test, en particulier dans le cas d'alternatives dissemblables. L’hypothèse nulle de la statistique de test stipule que les alternatives sont indépendantes les unes des autres. Une valeur de probabilité significative entraîne le rejet de l'hypothèse nulle et le choix d'une alternative peut affecter l'autre alternative et donc les résultats du modèle Logit ne sont pas plus cohérents (Vijverberg 2011). L'utilisation d'une variété de tests pré et post estimation rend les résultats de cette étude plus fiables et peuvent être adoptés pour des implications politiques.

## 4. Résultats empiriques et discussion :

Avant de commencer l'interprétation des paramètres estimés, nous avons d'abord appliqué le test LR afin de sélectionner le modèle le plus efficace et le plus robuste. Les résultats sont illustrés et interprétés pour le meilleur modèle sélectionné par le test LR. Afin d'augmenter la fiabilité de nos résultats, les coefficients estimés sont interprétés de trois manières: les ratios impairs, les ratios de risque relatif et les effets marginaux. En outre, les résultats du test de Wald sont également présentés pour vérifier la signification individuelle des paramètres de long terme. Enfin, pour vérifier l'hypothèse d'indépendance des alternatives non pertinentes (IIA), les résultats du test de Hausman sont listés pour vérifier la robustesse de nos résultats.

### 4.1. Test du rapport de vraisemblance

Différents modèles ont été estimés avec la sélection aléatoire de variables explicatives avec des critères de sélection à rebours, puis nous avons comparé leurs rapports de vraisemblance au rapport de vraisemblance du modèle plus général et « Unrestricted ». Sur la base des résultats de ce test, nous avons rapporté et interprété les résultats du modèle restreint qui est imbriqué dans le modèle non restreint. Les résultats pour le modèle « Restricted » sont listés dans le tableau 1.3 ci-dessous tandis que les résultats pour le modèle « Unrestricted » sont illustrés dans le tableau 1.1 de l'annexe 1.

**Tableau 1.2 : Résultats du test du rapport de vraisemblance :**

| | **Chi$^2$** | **df** | **Prob > Chi$^2$** |
|---|---|---|---|
| **LR test** | 6.93 | 14 | 0.9373 |

Les résultats de ce test indiquent clairement que le modèle restreint est plus efficace. Car, la valeur de probabilité de la statistique de test est hautement insignifiante avec le degré de liberté de 14 et nous acceptons l'hypothèse nulle. On peut en conclure que le modèle restreint est supérieur au modèle non restreint. Sur la base de ce test, nous avons

sélectionné le nombre de variables à inclure dans le modèle final et ses résultats sont présentés et interprétés dans le tableau 1.3.

### 4.2.Estimations de la régression Logit Multinomiale :

Les résultats de l'estimation de la régression Logit multinomiale sont présentés dans le tableau 1.3 ci-dessous.

Les paramètres de la régression MNL sont un peu confus lors de leur interprétation et il est difficile d'en tirer une signification économique (Green 2003). Les effets des variables explicatives sont interprétés par rapport à la catégorie de base de la variable dépendante. Cela devient un peu plus compliqué lorsque la variable explicative est également sous forme catégorielle. Dans ce cas, le coefficient estimé de la variable indépendante est interprété comme le changement de la variable dépendante par rapport à sa catégorie de base en raison d'un changement de la variable indépendante par rapport à sa catégorie de base (Long et Freese 2001). Les résultats sont illustrés pour les deux premières catégories de variables dépendantes (amélioration et dégradation) par rapport à la troisième catégorie (aucune). Ainsi, chaque coefficient est interprété pour la catégorie spécifique par rapport à la catégorie de référence. Toute valeur estimée montre la probabilité logarithmique d'être dans l'une ou l'autre catégorie par rapport à la catégorie de base pour une variation d'une unité de la variable explicative. Le signe positif du paramètre signifie que la catégorie correspondante est préférée tandis que l'inverse est vrai pour le signe négatif. Les deux dernières colonnes du tableau 1.3 montrent les ratios de risque relatif (RRR), c'est-à-dire le rapport entre la probabilité de choisir l'une ou l'autre catégorie et la probabilité de choisir la catégorie de référence. Une valeur positive et significative plus élevée signifie que la variable soutient fortement le résultat correspondant et vice versa.

**Tableau 1.3: Résultats de la régression Logit multinomiale et rapports de risque relatif (Résultats pour le modèle « Restricted »)**

| Variables | Improve | Degrade | Relative Risk Ratios | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Improve | Degrade |
| ***Data Related*** | | | | |
| l*obs* | 0.150<br>(.194) | 0.279<br>(.224) | 1.162<br>(.225) | 1.324<br>(.296) |
| l*t* | 0.896**<br>(.391) | 0.324<br>(.422) | 2.451**<br>(.959) | 1.382<br>(.584) |
| Panel | -0.067<br>(.537) | -0.140<br>(.649) | 0.934<br>(.501) | 0.869<br>(.564) |
| Income | -0.138<br>(.384) | -0.512<br>(.410) | 0.870<br>(.334) | 0.598<br>(.245) |
| Emission | -3.906***<br>(1.44) | -1.375<br>(1.33) | 0.020***<br>(.029) | 0.252<br>(.337) |
| ***Control Variables*** | | | | |
| GDP | 2.558**<br>(1.17) | 0.176<br>(.973) | 12.91**<br>(5.18) | 1.193<br>(1.16) |
| Trade | -0.224<br>(.539) | -0.679<br>(.580) | 0.799<br>(.430) | 0.507<br>(.294) |
| POP | -1.131**<br>(.537) | -0.390<br>(.566) | 0.322**<br>(.173) | 0.676<br>(.383) |
| EC | -0.743**<br>(.371) | -1.318***<br>(.419) | 0.475**<br>(.176) | 0.267**<br>(.112) |
| ***Methodology*** | | | | |
| GMM | 15.10<br>(95.3) | 14.54<br>(95.3) | 0.362<br>(2.16) | 2.081<br>(1.24) |
| FM/DOLS | -1.176<br>(.855) | -1.920**<br>(.890) | 0.308<br>(.263) | 0.146<br>(.130) |
| MG/PMG | -1.985**<br>(.941) | -3.184***<br>(1.03) | 0.137**<br>(.129) | 0.041**<br>(.042) |
| Other | -.500<br>(.889) | -1.305<br>(.923) | 0.605<br>(.539) | 0.271<br>(.250) |
| Test | 1.407***<br>(.416) | 1.387***<br>(.466) | 4.086***<br>(1.70) | 4.005***<br>(1.86) |
| ***Environmental Indicators*** | | | | |
| Chemical | -3.228**<br>(1.43) | -1.239<br>(1.26) | 0.039**<br>(.056) | 0.289<br>(.366) |
| Bio_Eco | -1.011<br>(.800) | 0.127<br>(.823) | 0.363<br>(.291) | 1.135<br>(.935) |

Note: Les valeurs entre parenthèses indiquent l'écart type. Les *, ** and *** montrent la signification statistique à 10%, 5% and 1% respectivement. Nombres des observations = 504, Log likelihood = -437.72, Pseudo $R^2$ = 0.104, Prob > $chi^2$ = 0.000

Pour commencer l'interprétation, nous nous référons d'abord aux variables liées aux données où seules deux variables, la période et l'émission, sont significatives. Le coefficient estimé montre qu'une variation d'une unité (augmentation ou diminution) de la période est associée à une variation de 0,896 unité de la probabilité logarithmique de

choisir le résultat « IMPROVE » par rapport à NONE. Cela peut se traduire par le fait que l'augmentation de la durée/ taille de l'échantillon d'analyse conduit à soutenir l'EKC. En d'autres termes, on peut en déduire que la réalisation de point d'inflexion du revenu (ITP) est un phénomène à long terme plutôt qu'à court terme. Le coefficient d'émission montre une diminution de 3,90 unités de la probabilité logarithmique de sélectionner la catégorie « IMPROVE » par rapport à la catégorie de base avec une augmentation d'une unité de la variable explicative. Cela signifie que lorsque la pollution est mesurée en tant qu'émission toxique, elle ne donne lieu à aucune relation plutôt qu'à l'existence de l'EKC. Les autres variables de la catégorie de données ne jouent aucun rôle significatif pour soutenir l'un ou l'autre type de relation. De la même manière, les résultats montrent que l'existence de l'EKC n'est pas pertinente pour le nombre d'observations. De même, les résultats ne varient pas si l'analyse est effectuée sur des données de panel ou des séries chronologiques, et si elle est effectuée sur des pays développés ou en développement. Les RRR indiqués dans les deux dernières colonnes sont également parallèles aux coefficients estimés et confirment les résultats pour tous les paramètres correspondants.

En ce qui concerne les variables de contrôle, la variable la plus importante qui apparaît significativement positive avec une valeur de coefficient plus élevée est le PIB. Elle confirme la validité de l'EKC pour la taille de l'échantillon considéré. La valeur estimée indique qu'une augmentation d'une unité du niveau du PIB soutient l'EKC de 2,55 unités et vice versa. Le RRR pour le PIB est le plus élevé parmi tous les paramètres estimés, ce qui reflète que l'augmentation du revenu entraîne une amélioration de la qualité de l'environnement. Ces résultats confirment les conclusions de Shafiei et Salim (2014); Bilgili et al. (2016); Churchill et al. (2018); et Desteck et Sarkodie (2019).

La variable commerce est associée de manière insignifiante à la catégorie « IMPROVE » avec un signe négatif. Cela signifie que la libéralisation du commerce affectera la qualité de l'environnement par un effet d'échelle (Sarkodie et Strezov 2019). La raison en est que le libre-échange augmente le volume de production qui, d'autre part, n'est jamais bénéfique pour la qualité de l'environnement. Mais dans notre cas, le coefficient estimé pour le commerce est non significatif, il ne joue donc pas un rôle important dans la détermination de l'un ou l'autre type de relation. Le RRR des paramètres valide les résultats estimés.

En ce qui concerne la population, il est significativement négatif avec une valeur assez grande (-1.13). Cela signifie qu'une augmentation inégale de la population nuira toujours à l'environnement par différents moyens tels que l'augmentation de la consommation, la déforestation, les activités économiques intensives et la pollution. De même, la probabilité d'appartenir à la catégorie « IMPROVE » est beaucoup plus faible que celle de la catégorie de référence indiquée par le RRR.

Le paramètre de la consommation d'énergie (EC) est également négativement significatif, montrant qu'une augmentation d'une unité diminuera le choix de la catégorie « IMPROVE » de 0,74 unité par rapport à la catégorie « NONE ». Le RRR est significativement plus faible pour la première catégorie (.47) par rapport à la catégorie de base (3.73).

Pour conclure, toutes les variables de la catégorie de contrôle jouent un rôle significatif dans la détermination de l'un ou l'autre type de relation.

La composition de la variable « METH » est catégorique, et chaque paramètre est interprété par rapport à sa catégorie de référence (ARDL) d'abord et à la variable dépendante ensuite. Les résultats empiriques de cette variable ne révèlent pas de rôle

significatif dans la détermination de l'un ou l'autre type de relation entre les variables dépendantes ou indépendantes. La seule variable ayant le paramètre le plus élevé est le GMM qui soutient de manière non significative la catégorie d'amélioration par rapport aux deux autres. Cependant, l'utilisation des estimateurs « FMOLS » ou « DOLS » et « MG/PMG » plaident en faveur de l'absence de relation EKC. Ces résultats soutiennent les affirmations de Stern (2010) et Wagner (2003) qui se sont opposés à l'utilisation d'approches linéaires pour estimer l'EKC. Quoi qu'il en soit, le RRR pour tous les choix de méthodes économétriques donne une valeur de probabilité assez faible pour tous les résultats. Cela confirme que, selon les différentes caractéristiques des données utilisées, les résultats ne sont pas pertinents selon le choix de la méthode économétrique.

Notons que les résultats de ces études empiriques ne puissent être jugés plus fiables que s'ils sont confirmés en effectuant des tests de robustesse. Le test de robustesse comprend soit un test de sous-échantillon, soit une estimation par des approches alternatives. La variable « Test » donne des résultats significatifs tout au long de l'analyse avec un coefficient plus élevé ainsi que le RRR le plus élevé en faveur de la catégorie « IMPROVE » par rapport à la catégorie « NONE ». Cela signifie que les résultats de ces études ne peuvent pas être utilisés pour annoncer des recommandations politiques car ils ne sont pas suffisamment robustes.

Enfin, le choix de l'indicateur de dommages environnementaux utilisé joue un rôle important dans l'influence de la relation revenu-environnement. Les valeurs négatives des coefficients des deux indicateurs (Chimical et Bio-Eco) signifient que la probabilité relative de se trouver dans la catégorie « IMPROVE » est très faible par rapport à la catégorie « NONE ». Cela signifie que le seul indicateur de pollution qui a le plus de chances de tomber dans la catégorie « IMPROVE » est celui des émissions anthropiques. Cela signifie que les émissions anthropiques jouent un rôle significatif par

rapport aux autres indicateurs que nous avons considérés dans cette étude. La pollution de l'air est étroitement liée à la qualité de l'environnement. On peut également en conclure que si nous voulons améliorer la qualité de l'environnement, nous devons travailler à la réduction de tous les gaz qui causent la pollution de l'air.

Les paramètres estimés pour les trois indicateurs sont également validés par le RRR correspondant.

### 4.3. Le Test de Wald

Le test de Wald a été utilisé pour déterminer si une variable explicative spécifique est significative ou non. Ce test vérifie l'hypothèse nulle selon laquelle deux coefficients sont simultanément égaux à zéro. Les résultats de ce test sont illustrés dans le tableau 1.4 ci-dessous.

**Tableau 1.4 : résultats du test de Wald**

| **Variables** | **Chi$^2$** | **df** | **Prob > Chi$^2$** |
|---|---|---|---|
| lt | 7.33 | 2 | 0.025 |
| Lobs | 1.56 | 2 | 0.457 |
| Panel | 0.05 | 2 | 0.976 |
| Income | 2.56 | 2 | 0.278 |
| Emission | 10.41 | 2 | 0.005 |
| GDP | 6.24 | 2 | 0.044 |
| Trade | 1.97 | 2 | 0.373 |
| Pop | 7.36 | 2 | 0.025 |
| GMM | 0.91 | 2 | 0.633 |
| FM/DOLS | 5.45 | 2 | 0.065 |
| MG/PMG | 9.89 | 2 | 0.007 |
| Other | 3.46 | 2 | 0.177 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Test | 11.94 | 2 | 0.002 |
| Chemical | 6.02 | 2 | 0.049 |
| Bio-Eco | 3.83 | 2 | 0.147 |

Globalement, les résultats de ce test sont parallèles à ceux des estimations MNL et valident nos résultats. Toutes les variables qui étaient significatives dans le tableau 1.4 le sont également ici. Cela confirme la validité de nos paramètres estimés.

### 4.4. Effets marginaux moyens :

Les coefficients du modèle estimés ci-dessus sont difficiles à interpréter et à en déduire d'une signification économique directe. C'est pourquoi les effets marginaux des probabilités doivent être calculés (Green 2003 ; p 722). Pour rendre les coefficients estimés plus élaborés, la variation absolue des probabilités, appelée effets marginaux (ME), est calculée.

Les « Mes » mesurent le changement absolu de la probabilité de la variable dépendante en raison d'un changement de la variable indépendante. Dans notre cas, nous avons trois catégories de variables dépendantes, donc les « Mes » mesurent la probabilité absolue de choisir une catégorie spécifique (par exemple, la j-ème) en raison du changement de la variable explicative. Le signe positif du paramètre estimé indique que la probabilité de choisir une catégorie spécifique augmente avec l'augmentation de la variable indépendante, tandis que le signe négatif indique la diminution de la probabilité de choisir cette catégorie.

Les « Mes » sont la variation de la probabilité de l'hypothèse « j » due à une variation d'une unité de la variable explicative (dans le cas du log, ces variations peuvent être interprétées comme des élasticités). Norton et al. (2019) affirment que dans la régression

logistique, les « Mes » sont les plus pratiques pour répondre à la question de savoir comment un changement du facteur de risque se reflète dans un résultat.

La seule différence est que les estimations de la régression MNL interprètent les coefficients par rapport à une catégorie de référence tandis que les « Mes » montrent le changement absolu.

Le tableau 1.3 illustre les résultats pour deux catégories par rapport à la catégorie de base « NONE » tandis que le tableau 1.5 suivant présente les résultats pour les trois catégories de la variable dépendante.

Les estimations des coefficients du tableau 1.3 peuvent éventuellement être différentes en termes de signes et de niveau de signification de celles du tableau 1.5. Cela est possible parce que la régression MNL rapporte l'estimation des paramètres par rapport à la catégorie de base « NONE » tandis que les MEs montrent le changement absolu de la probabilité de l'hypothèse « j » en raison de la variation des variables explicatives (Sebri 2015).

Les effets marginaux moyens calculés montrent que les paramètres estimés reflètent la même image que dans MNL et soutiennent l'existence d'EKC (Farhani et al. 2014; Moutinho et al. 2017; Pata 2018; etc.). Le PIB apparaît significativement positif pour augmenter la probabilité de trouver une catégorie d'amélioration par rapport aux deux autres. Il s'agit du résultat le plus important de l'étude qui contredit les conclusions d'une méta-analyse précédente, Li et al. (2007), concernant l'absence d'EKC. La raison de cette controverse peut être l'utilisation d'une base de données plus large et plus récente dans notre étude. Le graphique des probabilités prédites dans la figure 1.1 (dans l'annexe

1)[1] montre que le PIB est seulement positif pour la catégorie « IMPROVE ». Il semble significativement positif pour augmenter la probabilité de l'existence d'une relation monotone décroissante et vice versa pour les deux autres possibilités.

**Tableau 1.5 : Effets Marginaux Moyens**

| Variables | Improve | Degrade | None |
|---|---|---|---|
| ***Data Related*** | | | |
| lt | 0.156***<br>(.057) | -0.068<br>(.049) | -0.087**<br>(.045) |
| lobs | -0.005<br>(.032) | 0.028<br>(.029) | -.023<br>(.022) |
| Panel | 0.004<br>(.096) | -0.015<br>(.090) | 0.010<br>(.063) |
| Income | 0.040<br>(.054) | -0.071<br>(.045) | 0.030<br>(.045) |
| Emission | -0.686***<br>(.206) | 0.305**<br>(.144) | 0.381**<br>(.162) |
| ***Control Variables*** | | | |
| GDP | 0.552**<br>(.216) | -0.329**<br>(.158) | -0.222**<br>(.121) |
| Trade | 0.045<br>(.077) | -0.089<br>(.065) | 0.044<br>(.063) |
| Pop | -0.200***<br>(.071) | 0.089<br>(.059) | 0.110*<br>(.063) |
| EC | 0.018<br>(.059) | -0.130**<br>(.052) | 0.112***<br>(.042) |
| ***Methodology*** | | | |
| GMM | 0.159<br>(.123) | -0.086<br>(.124) | -0.072<br>(.049) |
| FM/DOLS | 0.048<br>(.098) | -0.202**<br>(.098) | 0.153**<br>(.064) |
| MG/PMG | -0.011<br>(.121) | -0.305***<br>(.105) | 0.317***<br>(.104) |
| Other | 0.114<br>(.103) | -0.184*<br>(.104) | 0.069<br>(.058) |
| Test | 0.121**<br>(.062) | 0.049<br>(.055) | -0.170***<br>(.048) |
| ***Environmental Indicators*** | | | |
| Chemical | -0.456***<br>(.100) | 0.098<br>(.176) | 0.358*<br>(.209) |
| Bio_Eco | -0.240**<br>(.112) | 0.168<br>(.120) | 0.071<br>(.107) |

En outre, la période, l'émission, la population et les indicateurs environnementaux sont également parallèles aux résultats précédents. L'importance de la variable de la période

[1] Les annexes de chaque chapitre sont présentées à la fin de chaque chapitre correspondant

valide le fait que la réalisation de l'EKC est un phénomène à long terme et n'est possible que lorsque le point d'inflexion de revenue (ITP) est réalisé.

La consommation d'énergie est positivement significative pour la catégorie « NONE ». Cela signifie qu'une augmentation de la CE entraîne toujours des émissions, comme l'ont noté Liu et al. (2019), et augmente le temps nécessaire pour atteindre pour le point d'inflexion de revenue (ITP). Pour faire face à ces situations, il est obligatoire d'augmenter la part des technologies efficaces dans le secteur de l'énergie (Balezentis et al. 2019).

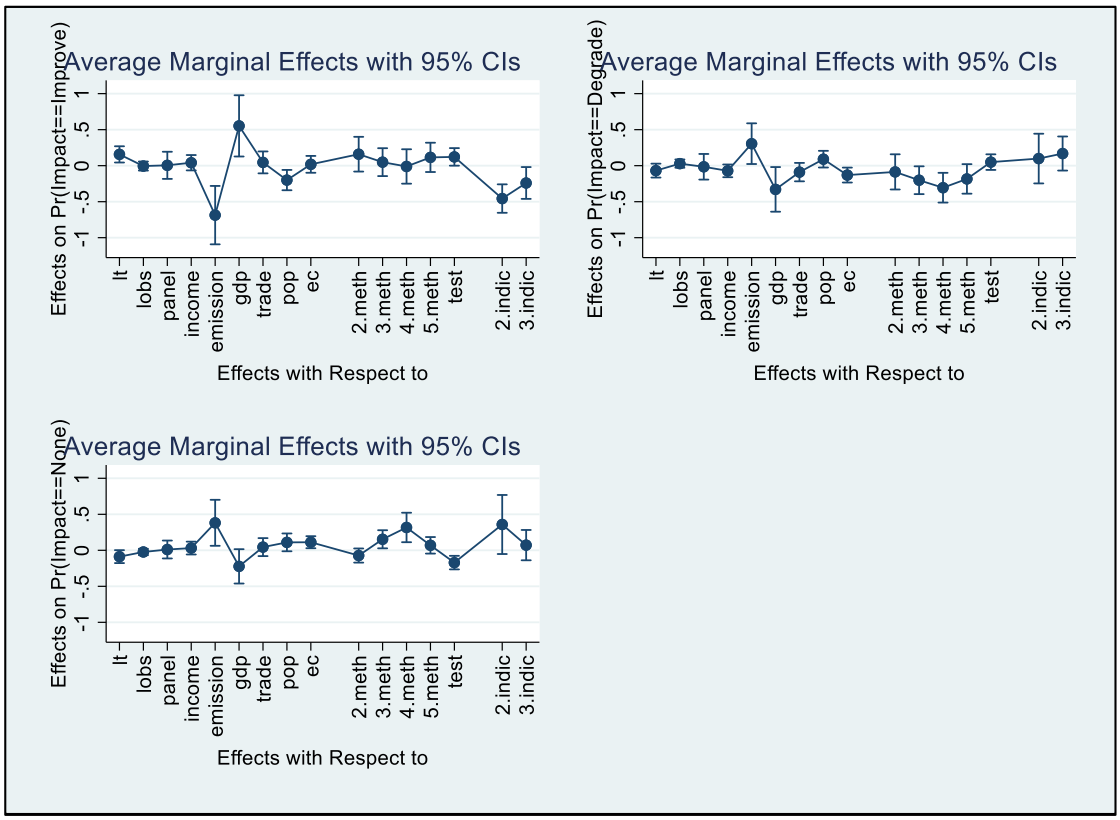
Les MEs pour la population sont négativement significatifs pour « IMPROVE » et positivement significatifs pour la catégorie « NONE ». Cela signifie que la croissance inégale de la population a toujours été une menace pour l'environnement et augmente les émissions (Ridzuan 2019).

En ce qui concerne les indicateurs environnementaux (Chemical, Bio_Eco, ANTHRO), tous sont significatifs pour déterminer l'une ou l'autre catégorie de la variable dépendante. En tout état de cause, les émissions anthropiques sont les plus susceptibles de soutenir la relation de EKC par rapport aux deux autres catégories. Ces résultats rejettent également l'argument de Mrabet et Alsamara (2017) qui ont étudié l'existence de la relation EKC uniquement pour les empreintes écologiques. L'indicateur chimique montre une diminution significative du soutien à la catégorie d'amélioration, contrairement à Grossman et Krueger (1991); Ridzuan (2019), tout en soutenant de manière significative la catégorie de base.

Enfin, l'indicateur de pollution environnementale liée à la biologie est plus susceptible de trouver une relation décroissante monotone. La figure 1.5 illustre les courbes ajustées pour les ME moyennes de toutes les catégories de la variable dépendante. Il est évident,

d'après le comportement de toutes les variables explicatives, que les résultats obtenus tout au long de l'étude confirment la validité de l'existence de l'EKC et sont cohérents tout au long de l'analyse.

**Figure 1.5: Tracé ajusté du modèle estimé pour toutes les catégories**




### 4.5.Test d'indépendance des alternatives non pertinentes (IIA):

Le test de Hausman et McFadden (1984) a été utilisé pour vérifier l'hypothèse selon laquelle les chances de résultat-*J* par rapport à résultat-*k* sont indépendantes les unes des autres. Cela signifie que l'omission ou l'ajout d'une catégorie laisse les autres alternatives inchangées (Green 2003). Afin d'en étudier la validité, nous avons calculé le test *J – 1* en omettant les catégories restantes (amélioration et dégradation) une par une. Les résultats présentés dans le tableau 1.6 montrent que les valeurs « p » sont insignifiantes et que nous acceptons l'hypothèse nulle de IIA.

Cela ressort des résultats du test que toutes les catégories alternatives de la variable dépendante sont indépendantes les unes des autres. Les valeurs de probabilité pour les deux catégories « IMPROVE » et « Degrade » sont non significatives avec des degrés de liberté de 8 et 14 respectivement. Dans ce cas, nous acceptons l'hypothèse nulle d'indépendance entre les alternatives.

**Tableau 1.6 : Résultats du test de Hausman et McFadden.**

| Omitted | $Chi^2$ | df | Prob > $Chi^2$ |
|---|---|---|---|
| Improve | 0.88 | 8 | 0.998 |
| Degrade | 2.14 | 14 | 0.999 |

Cela signifie que toutes les catégories de la variable dépendante sont indépendantes les unes des autres et que l'inclusion ou l'exclusion de l'une d'entre elles n'affecte pas les deux autres. Cela valide que la régression multinomiale est appropriée pour notre analyse.

Les résultats présentés et interprétés jusqu'à présent sont parallèles et alignés les uns sur les autres. Ce calcul d'une grande variété de tests de robustesse rend les résultats plus fiables et plus précis pour les implications politiques.

## 5. Conclusion et implications politiques :

Compte tenu du travail considérable effectué pour la validation empirique de l'EKC, nous avons étudié la littérature en profondeur en utilisant des outils quantitatifs avancés. Pour la première fois, cette étude a utilisé un large échantillon de données comprenant 101 articles de recherche publiés avec 504 observations et employant la régression MNL pour estimer les paramètres.

La principale contribution de notre étude a la littérature est double :

- Premièrement, elle développe un nouveau cadre PRIMRA, qui est une extension du cadre PRISMA développé par Moher et al. (2009). PRIMRA devrait fournir des lignes directrices utiles pour les recherches et les méta-analyses futures ;
- Deuxièmement, elle clarifie l'ambiguïté concernant l'existence de l'EKC. Les résultats de cette étude sont plus robustes en raison de l'utilisation de divers tests de signification et de robustesse et peuvent être adaptés pour des recherches futures.

Le résultat le plus important de cette étude est la validation de l'EKC. Nous avons constaté que la validation de cette relation est sans rapport avec le choix de l'ensemble de données, les variables de contrôle et le choix de la méthode économétrique. On peut en déduire que la croissance économique conduira d'abord à la détérioration de la qualité de l'environnement mais qu'au-delà du point d'inflexion de revenue (ITP), elle améliorera sa qualité. Bien qu'atteindre un niveau de revenu souhaité ne soit possible qu'à long terme.

D'autre part, l'augmentation inégale de la population est associée à une utilisation excessive des ressources et à une augmentation de la pollution.

Les résultats de cette étude reconnaissent l'impact négatif de l'augmentation de la population sur la qualité de l'environnement.

De la même manière, l'utilisation de l'énergie est également nuisible car elle entraîne des émissions toxiques et une dégradation de l'environnement.

Contrairement à la littérature empirique, nous avons observé que le choix de la méthodologie économétrique n'a pas de rôle significatif dans la détermination de ces deux types de relation. Quoi qu'il en soit, l'outil d'estimation MG/PMG est apparu significatif tout au long de l'estimation.

La question la plus importante mise en évidence dans la littérature empirique est de savoir comment mesurer la pollution environnementale. Différents types d'indicateurs ont été utilisés dans la littérature. Nous avons constaté que les résultats sont sensibles au choix des indicateurs de pollution environnementale. Les mesures liées à l'activité humaine sont plus susceptibles de soutenir l'existence d'une EKC, tandis que les indicateurs chimiques et biologiques affaiblissent la possibilité de l'existence de cette relation.

Les résultats de cette étude sont plus fiables grâce à l'utilisation de tests de robustesse pré- et post-estimation. Tout d'abord, le modèle a été sélectionné en utilisant le test LR qui a indiqué l'utilisation d'un modèle restreint au lieu d'un modèle non restreint. Les coefficients estimés sont interprétés de trois façons : les rapports impairs, les RRR et les ME moyennes. Dans une large mesure, les résultats sont restés les mêmes et ont été confirmés par l'utilisation du test de Wald pour la signification individuelle des coefficients. En outre, l'hypothèse la plus importante de la régression MNL, IIA, a également été validée en utilisant le test de Hausman et McFadden qui augmente la fiabilité des résultats.

Les résultats de notre étude ont de fortes implications politiques. En effet, nous avons mis en évidence que la réalisation du point d’inflexion de revenue (ITP) soit un phénomène de long terme et qu'il y a donc un immense besoin d'élaborer des politiques publiques de long terme à la fois au niveau local, régional et mondial.

Nous avons constaté que la consommation d'énergie a toujours contribué négativement au climat, il est donc indispensable d'adopter des politiques qui encouragent l'utilisation de technologies efficaces en matière de carbone et réduisent les émissions.

Enfin, les chercheurs peuvent bénéficier des résultats de cette étude non seulement en adoptant le nouveau cadre développé mais aussi les principales raisons responsables des dommages climatiques. Dans de nombreux cas, les analyses quantitatives sont préférées aux analyses qualitatives. Les chercheurs peuvent se fier davantage aux résultats de cette étude car elle suit une procédure économétrique appropriée.

Sur la base de nos résultats, on peut déduire que la qualité de l'environnement s'améliorera lorsque toutes les nations auront achevé le processus de développement à long terme. Mais des questions se posent : est-il possible que le monde entier puisse se développer et atteindre les ITP ? Si oui, alors pourquoi y a-t-il des urgences climatiques ? Pourquoi le monde est-il trop conscient du changement climatique et de ses impacts dramatiques ? Y a-t-il un problème dans le processus de développement ou les économies convergent-elles très lentement ? Les ressources naturelles disponibles sont-elles suffisantes pour survivre jusqu'à ce que le monde atteigne le point d'inflexion de revenue (ITP) ?

Ce dilemme a donné naissance à une nouvelle phase de recherche qui doit être étudiée afin de minimiser les dommages du développement au détriment de l'environnement. D'autre part, il est nécessaire d'adopter un indicateur de dégradation de l'environnement qui soit plus complet. De même, l'hypothèse EKC devrait être étudiée en utilisant des outils d'estimation de deuxième génération qui sont plus robustes à divers défis économétriques. Enfin, la consommation d'énergie a toujours eu un impact négatif sur l'environnement et il est nécessaire de passer des énergies fossiles aux énergies renouvelables. Bien que ce passage ne soit pas une tâche facile et qu'il ait un impact négatif sur la croissance du PIB, les recherches futures devraient se concentrer sur l'étude de l'impact de l'énergie sur l'environnement. Les recherches futures devraient donc se concentrer sur l'étude de la manière dont les énergies renouvelables peuvent

contribuer à atténuer le changement climatique sans affecter la croissance. En gardant à l'esprit le scénario d'émission nette de carbone zéro de l'accord de Paris jusqu'en 2050, la partie suivante de cette étude se concentre sur la question de savoir si cet objectif peut être atteint ou non ?

# Annexe 1

**Figure 1.1: Tracé ajusté des coefficients estimés du PIB pour toutes les catégories**

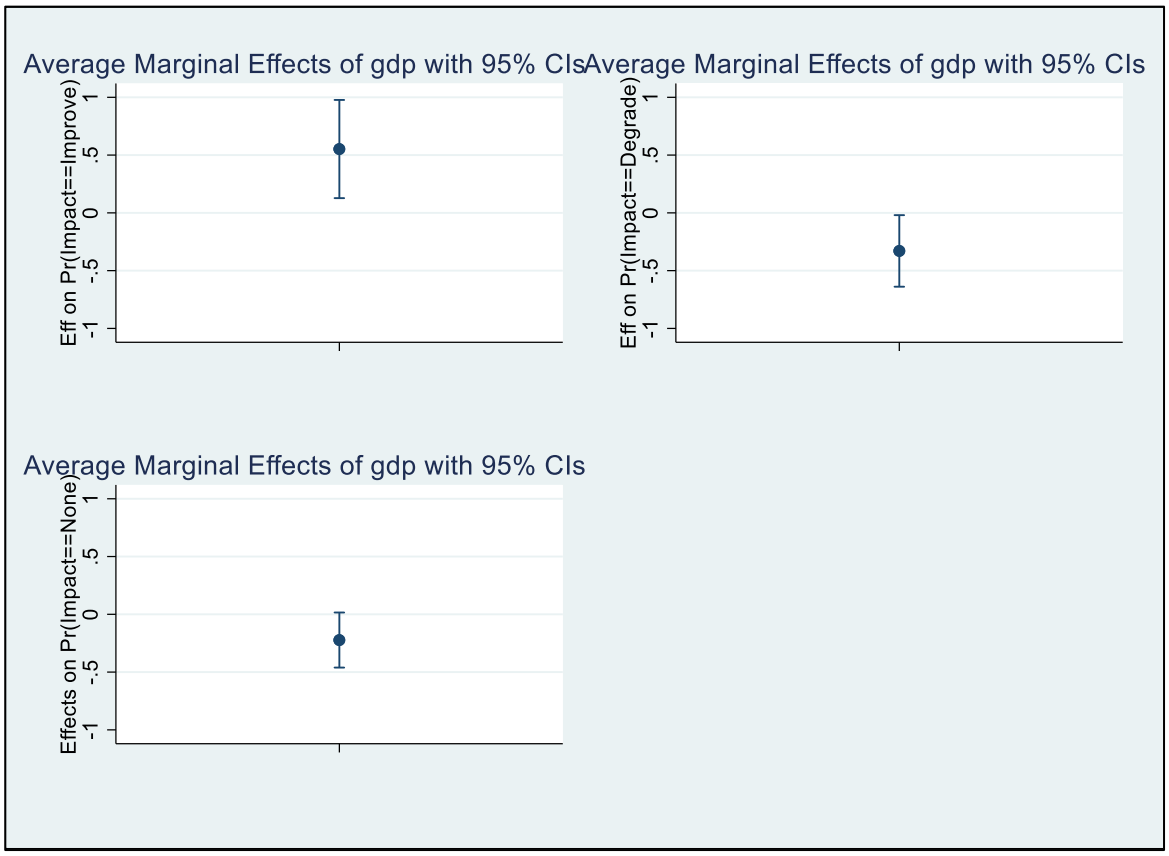



**Tableau 1.1: Résultats de la modèle « Unrestricted »**

| Variables | Improve | Degrade |
|---|---|---|
| | ***Data related*** | |
| l*t* | 1.079**<br>(0.438) | 0.341<br>(0.469) |
| lo*bs* | 0.119<br>(0.226) | 0.275<br>(0.249) |
| Panel | 0.557<br>(0.876) | -0.030<br>(0.936) |
| CC | -0.572<br>(0.721) | 0.033<br>(0.740) |
| Income | -0.136<br>(0.392) | -0.437<br>(0.418) |
| Emission | -3.375**<br>(1.517) | -1.463<br>(1.412) |
| | ***control variables*** | |
| GDP | 2.716**<br>(1.207) | 0.261<br>(1.048) |
| Trade | 0.032 | -0.491 |

| | | |
|---|---|---|
| | (0.575) | (0.617) |
| POP | -1.167**<br>(0.595) | -0.334<br>(0.625) |
| EC | -0.804*<br>(0.484) | -1.462***<br>(0.532) |
| FD | -0.575<br>(0.479) | -0.361<br>(0.571) |
| FDI | -0.712<br>(1.165) | -0.629<br>(1.243) |
| Inst | 16.532<br>(1295) | 14.684<br>(1295.4) |
| ***Methodology*** | | |
| GMM | 16.201<br>(859.8) | 15.636<br>(859.8) |
| FM/DOLS | -1.162<br>(0.989) | -1.893***<br>(1.033) |
| MG/PMG | -1.980**<br>(0.978) | -3.246***<br>(1.082) |
| Other | -0.291<br>(0.986) | -1.295<br>(1.036) |
| ***Significance*** | | |
| Pedroni | 0.416<br>(1.121) | 0.563<br>(1.222) |
| DH | -0.153<br>(1.513) | 0.029<br>(1.575) |
| VECM | 0.166<br>(1.144) | 0.222<br>(1.220) |
| None | 0.071<br>(1.047) | -0.374<br>(1.124) |
| Test | 1.625***<br>(0.467) | 1.420***<br>(0.512) |
| ***Environmental Indicator*** | | |
| Chemical | -2.797**<br>(1.483) | -1.379<br>(1.342) |
| Bio_Eco | -0.359<br>(1.214) | 0.256<br>(1.222) |

Note: Les valeurs entre parenthèses indiquent l'écart type. Les *, ** and *** montrent la signification statistique à 10%, 5% and 1% respectivement. Nombres des observations = 504, Log likelihood = -434.25, Pseudo $R^2$ = 0.111, Prob > $chi^2$ = 0.000

# Chapitre 2

# L’analyse empirique de la courbe de Kuznets : Cas des pays Européennes

## 1. Introduction

La théorie de la courbe de Kuznets environnementale a attiré l'attention dans les années 1990, lorsque le monde s'est rendu compte que la température moyenne de la Terre augmentait de façon spectaculaire et provoquait un changement climatique mondial. Entre-temps, le Sommet de la Terre de Rio 1992 s'est tenu au Brésil, réunissant des délégations de plus de 150 pays, ainsi que des représentants d'organisations non gouvernementales du monde entier. L'un des résultats les plus importants de ce sommet a été l'adoption de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (UNFCCC) afin de bien comprendre ce qu'est le changement climatique et comment y faire face. Le changement climatique a été déclaré comme étant le résultat des activités économiques humaines et de l'industrialisation rapide. Ces activités sont considérées comme les raisons fondamentales de la production de gaz à effet de serre comme le méthane et le $CO_2$, etc. (Brock et Taylor 2005).

De nos jours, le réchauffement de la planète fait l'objet d'un grand débat. Des efforts sont déployés à différents niveaux pour s'attaquer au problème du changement climatique et en vue d’une décarbonisation des activités économiques. L'objectif consiste à réduire les émissions de gaz à effet de serre responsables de ce réchauffement, et donc fixer l’augmentation de la température mondiale au-dessous de 1.5$^{o}$C par rapport à la moyenne à l’époque préindustrielle de 1990.

Plusieurs pays, dont de nombreux États de l'Union européenne, se sont engagés à réduire les émissions de carbone. La Commission européenne a adopté une série de propositions

dans le cadre du pacte vert (green deal) visant à adapter les politiques de l'UE en matière de climat, d'énergie, de transport et de fiscalité en vue de réduire les émissions nettes de gaz à effet de serre d'au moins 55 % d'ici à 2030 par rapport aux niveaux de 1990.

Cela nécessitera des changements structurels dans la consommation d'énergie, comme le passage des combustibles fossiles aux énergies renouvelables et l'utilisation de technologies à faible émission de carbone par rapport aux technologies conventionnelles.

Le développement économique rapide et la mondialisation ont eu l'avantage de réduire les barrières commerciales, le transfert de technologies et la mobilité de la main-d'œuvre. Mais, en même temps, ils ont également augmenté la pollution en raison d'une consommation énergétique importante. La croissance économique a favorisé le développement d'activités industrielles à forte intensité énergétique qui génèrent des émissions de carbone et d'autres gaz anthropiques (Brock et Taylor, 2005).

Ce dilemme entre la qualité de l'environnement et la croissance économique soulève la question de savoir si la croissance économique est toujours souhaitable (Moutinho et al. 2017). Par conséquent, comprendre l'impact de la croissance économique sur la qualité de l'environnement constitue l'un des sujets majeurs qui mérite d'être profondément analysé.

C'est dans ce cadre qu'a émergé la théorie de la courbe de Kuznets environnementale (EKC), qui a été largement analysée empiriquement dans la littérature.

La courbe de Kuznets environnementale (EKC) essaye d'expliquer l'association entre le niveau de revenu et la qualité de l'environnement. Il s'agit d'une relation hypothétique entre le revenu par habitant et divers indicateurs de la dégradation de l'environnement.

En effet, Grossman et Kreuger (1991) ont constaté qu'il existe une relation en forme de U inversé entre le revenu par habitant et la qualité de l'environnement. La croissance du revenu s'accompagne généralement d'une dégradation de l'environnement jusqu'à un certain niveau de revenu, après quoi des changements positifs se produisent dans l'environnement (Shafik 1994). Au début, la croissance économique entraîne une augmentation de la pollution et une dégradation de l'environnement jusqu'à un certain point au-delà duquel une amélioration de l'environnement se produit avec une augmentation de la croissance économique (Stern 2003).

Cela implique que la dégradation de l'environnement est une fonction quadratique du niveau de revenu et que, par conséquent, on obtient une courbe en forme de U inversé (Panayotou 1993).

En résumé, selon EKC, on peut dire qu'à court terme, l'environnement sera endommagé au nom de la croissance, mais qu'à long terme, la nature se rétablira lorsque toutes les économies du monde auront franchi un certain seuil de revenu.

La question qui se pose étant de savoir s'il est possible pour toutes les nations de se développer pour atteindre ce seuil de revenu et de restaurer ainsi la qualité de l'environnement ? Combien de temps sera-t-il nécessaire pour que le monde entier se développe ? Les ressources naturelles existantes dans le monde suffiront-elles à absorber la pression exercée par le développement des économies de tous les pays à court terme ?

De nombreuses études dans la littérature ont examiné la relation quadratique entre ces deux variables et ont trouvé des résultats différents. Plus de la moitié de la littérature examinée confirme la validité des hypothèses de l'EKC et la recommande pour la formulation des politiques publiques (Dinda et Coondoo 2006 ; Tamazian et Rao 2010

; Shahbaz et al. 2013 ; Apergis et Ozturk 2015 ; Ahmed et al. 2016 ; Destek et Sarkodie 2019).

A l'opposé, selon un autre courant de recherche, ce type de relation n'existe pas et ne recommande pas son utilisation pour les politiques environnementales. Ils affirment que toute politique basée sur cette relation peut donner des résultats fallacieux et qu'une telle politique n'est pas applicable en pratique (Pao et al. 2011 ; Begum et al. 2015 ; Al Mulali et al. 2015 ; Azam et Khan 2016 ; Zhu et al. 2016 ; Liu et al. 2017 ; Zambrano et al. 2018 ; Bese et Kalayci 2019).

La principale différence entre ces études contradictoires réside dans le fait qu'elles utilisent des méthodologies économétriques et des échantillons de données différents. D'autre part, les études empiriques mesurent la pollution de différentes manières, comme la pollution de l'air, la pollution de l'eau ou les déchets biologiques. La plupart des études mesurent la pollution environnementale en fonction des émissions de gaz anthropogéniques et n'expliquent que l'approche basée sur la consommation (Destek et Sarkodie 2019).

Bien que la dégradation de l'environnement ne soit pas un phénomène unidimensionnel et qu'elle comprenne de nombreux indicateurs (Wackernagel et Rees 1998 ; Saqib et Benhmad 2021).

Les mesures basées sur un seul indicateur peuvent donner des résultats erronés. Il est donc nécessaire d'utiliser un indicateur qui prenne en compte tous les aspects de la dégradation de l'environnement.

C'est pour cela que nous croyons que l'empreinte écologique (EF) constitue un outil plus précis de mesure et de visualisation des ressources nécessaires au maintien de la

planète. L'EF prend en compte l'empreinte carbone, les forêts, les pâturages, la pêche et les terres cultivées.

Compte tenu des arguments ci-dessus, le principal objectif de cette étude est d'étudier empiriquement la courbe de Kuznets environnementale en utilisant l'EF comme mesure de la dégradation de l'environnement pour 22 pays européens. Cette étude s'inscrit dans le prolongement de la méta-analyse de Saqib et Benhmad (2021) qui a montré que l'existence de la courbe de Kuznets environnementale est sensible aux indicateurs de pollution environnementale. Ils ont également constaté que des outils économétriques de deuxième génération devraient être adoptés pour étudier la validité empirique de l'EKC.

Notre étude contribue à la littérature à deux niveaux :

- Premièrement, il s'agit de la toute première tentative d'utiliser la FE comme indicateur de la pollution environnementale au sein des pays européens.
- Deuxièmement, contrairement à la littérature précédente, nous avons pris en compte le problème de la dépendance transversale et, suivant Destek et Sarkodie (2019), nous avons adopté des outils et des techniques économétriques plus efficaces. Une caractéristique distinctive de cette étude est qu'elle emploie un autre ensemble d'approches économétriques efficaces pour l'analyse de robustesse de nos résultats en utilisant la méthodologie d'Eren et al. (2019).

Le reste de notre étude est organisé de la manière suivante. La section 2 donne un aperçu détaillé de la revue de la littérature sur la courbe de Kuznets environnementale. La section 3 traite du modèle analytique tandis que la section 4 illustre la méthodologie d'estimation et la description des données. La section 5 illustre les résultats empiriques

et la discussion à la lumière de la littérature. La section 6 conclut et donne quelques recommandations politiques.

## 2. Revue de la Littérature

L'idée de l'hypothèse de la courbe de Kuznets commence avec le travail pionnier de Kuznets (1955), qui a étudié la relation en forme de U inversé entre l'inégalité des revenus et le revenu par habitant. La relation entre ces deux variables est double. Au début (faible revenu), l'inégalité des revenus augmente en même temps que le revenu par habitant, mais à partir d'un certain point (revenu moyen), l'inégalité commence à diminuer avec de nouvelles améliorations du revenu par habitant (revenu élevé) et l'économie converge vers l'égalité des revenus (Kuznets 1955). L'étude pionnière de Grossman et Krueger (1991) a suivi la théorie de la courbe de Kuznets et a examiné la relation entre la qualité de l'air et la croissance des revenus. Ils ont constaté l'existence d'une relation en forme de U inversé et ont confirmé l'existence de l'hypothèse de la courbe de Kuznets. Plus tard, Lucas et al. (1992), Panayotou (1993, 1997), Selden et Song (1995) Vincent (1997) ont également constaté l'existence d'une courbe en forme de U inversé et l'augmentation de la pollution de l'air au cours des premières étapes du développement, mais au-delà de la phase intermédiaire, la qualité de l'air s'améliore et la pollution diminue à mesure que le processus de développement se poursuit. Ces contributions séminales ont permis l'émergence de la courbe de Kuznets environnementale (EKC). Cette théorie a reçu une attention particulière de la part des décideurs politiques et des scientifiques de l'environnement. En effet, au cours des deux dernières décennies, de nombreuses études empiriques, testant les hypothèses de la courbe de Kuznets environnementale, ont été menées pour étudier la question en profondeur en utilisant divers outils économétriques pour l'analyse d'un seul ou de

plusieurs pays. Mais la fréquence des études a augmenté dans un passé récent, c'est pourquoi nous avons envisagé d'inclure les études à partir de 2006 jusqu'à 2019.

## Tableau 2.1 : Revue de la littérature

| Study | Data | Variables | Methodology | EKC hypothesis |
|---|---|---|---|---|
| Dinda & Coondoo (2006) | 88 countries 1960-1990 | $CO_{2pc}$, $GDP_{pc}$ | Granger Causality, ECM | Yes |
| Jalil and Mahmud (2009) | China 1975-2005 | $CO_2$, GDP, EC, TR | ARDL | Yes |
| Tamazian et al. (2009) | BRIC 1992-2004 | $CO_2$, GDP, FD, FDI, EC | Standard reduced-form modeling | Yes |
| Fodha and Zaghdoud (2009) | Tunisia 1961-2004 | $CO_2$, $SO_2$, GDP | Panel Cointegration | $CO_2$ → Yes $SO_2$ → No |
| Iwata et al. (2010) | France 1960-2003 | $CO_2$, GDP, $EC_{nuvlear}$, POP, TR | ARDL | Yes |
| Pao and Tsai (2010) | BRIC 1971-2005 | $CO_2$, GDP, EC | Panel Cointegration | Yes |
| Tamazian and Rao (2010) | Transition economies 1993-2004 | $CO_2$, GDP, FDI, FD, TR, Infl, EC, $IQ_{inst}$, $E_{import}$ | GMM | Yes |
| Nasir and Rehman (2011) | Pakistan 1972-2008 | $CO_2$, GDP, TR, EC | Johansen cointegration | Yes |
| Pao et al. (2011) | Russia 1990-2007 | $CO_2$, GDP, EC | Johansen cointegration | No |
| Ahmed and Long (2012) | Pakistan 1971-2008 | $CO_2$, GDP, EC, TR, Pop | ARDL | Yes |
| Arouri et al. (2012) | MENA 1981-2005 | $CO_2$, GDP, EC | Bootstrap Panel cointegration | Yes |
| Esteve and Tamarit (2012) | Spain 1857-2007 | $CO_2$, GDP | Threshold cointegration | Yes |
| Saboori et al. (2012) | Malaysia 1980-2009 | $CO_2$, GDP | ARDL | Yes |
| Shahbaz et al (2012) | Pakistan 1971-2009 | $CO_2$, GDP, TR, EC | ARDL | Yes |
| Shahbaz et al (2013) | Romania 1980-2010 | $CO_2$, GDP, EC | ARDL | Yes |
| Tiwari et al. 2013 | India 1966-2009 | $CO_2$, GDP, TR, $EC_{coal}$ | ARDL | Yes |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Farhani et al. (2014) | 10 MENA 1990-2010 | $CO_2$, GDP, TR, EC | DOLS/FMOLS | Yes |
| Lau et al. (2014) | Malaysia 1970-2008 | $CO_2$, GDP, TR, FDI | ARDL | No |
| Shafiei and Salim (2014) | OECD 1980-2011 | $CO_2$, GDP, EC, RE, NRE | GMM | Yes |
| Al Mulali et al. (2015) | Vietnam 1981-2011 | $CO_2$, GDP, TR, FDI, FD, EC | ARDL | No |
| Apergis and Ilhan (2015) | 14 Asian 1990-2011 | $CO_2$, GDP, POP, $IQ_{inst}$, land, industry | GMM | Yes |
| Begum et al. (2015) | Malaysia 1970-2009 | $CO_2$, GDP, POP, EC | ARDL, DOLS | No |
| Boluk and Mert (2015) | Turkey 1961-2010 | $CO_2$, GDP, RE | ARDL | Yes |
| Heidari et al. (2015) | 5 ASEAN 1980-2008 | $CO_2$, GDP, $EC_{re}$ | Panel smooth transition regg | Yes |
| Jebli and Youssef (2015) | Tunisia 1980-2009 | $CO_2$, GDP, TR, RE, NRE | ARDL | No |
| Omri et al. (2015) | 12 MENA 1990-2011 | $CO_2$, GDP, TR, RE, NRE, FD | GMM | Yes |
| Ozturk and Al Mulali (2015) | Cambodia 1996-2012 | $CO_2$, GDP, EC, TR, POP, Gov, Corruption | GMM, TSLS | No |
| Ahmed et al. (2016) | 24 EU 1980-2010 | $CO_2$, GDP, $EC_{bio}$, Technology | PMG | Yes |
| Al Mulali et al. (2016a) | Kenya 1980-2012 | $CO_2$, GDP, RE, NRE, POP | ARDL | No |
| Al Mulali et al. (2016b) | 7 Regions 1980-2010 | $CO_2$, GDP, RE, POP, TR, FD | DOLS | 5 regions→ Yes<br>2 regions → No |
| Alam et al. (2016) | 4 countries 1970-2012 | $CO_2$, GDP, EC, POP | ARDL | For 3→ Yes<br>For India → No |
| Azam and Khan (2016) | 4 countries 1975-2014 | $CO_2$, GDP, EC, POP, TR | Johansen CI, OLS | For 2 → Yes<br>For 2 → No |
| Bento and Moutinho (2016) | Italy 1960-2011 | $CO_2$, GDP, RE, NRE, TR | ARDL | Yes |
| Bilgili et al. (2016) | 17 OECD 1977-2010 | $CO_2$, GDP, RE | DOLS, FMOLS | Yes |
| Dogan and Turkekul (2016) | US 1960-2010 | $CO_2$, GDP, EC, POP, TR, FD | ARDL | No |
| Dogan and Seker (2016) | EU 1980-2012 | $CO_2$, GDP, RE, NRE, TR | DOLS | Yes |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Jebli et al. (2016) | 25 OECD 1980-2010 | $CO_2$, GDP, TR, RE, NRE | DOLS, FMOLS | Yes |
| Kang et al. (2016) | China 1997-2012 | $CO_2$, GDP, EC, POP, TR | Pooled OLS, Spatial Models | Yes |
| Li et al. (2016) | China 1996-2012 | $CO_2$, $Solid_{waste}$, $Water_{waste}$, GDP, EC, POP, TR | GMM, ARDL | Yes |
| Zhu et al. (2016) | 5 ASEAN 1981-2011 | $CO_2$, GDP, TR, FDI, FD, EC | Panel Quantile Regression | No |
| Adu and Denkyirah (2017) | Africa 1970-2013 | $CO_2$, $Waste_{renewable}$, GDP, POP, TR | Panel Regression | No |
| Ahmad et al. (2017) | Croatia 1992-2011 | $CO_2$, GDP, | ARDL, DOLS, FMOLS | Yes |
| Ali et al. (2017) | Malaysia 1971-2012 | $CO_2$, GDP, TR, FDI, FD, EC | ARDL, DOLS | No |
| Aye and Edoja (2017) | 31 countries 1971-2-13 | $CO_2$, GDP, POP, FD, EC | Kremer Threshold causality | No |
| Danish et al. (2017) | Pakistan 1970-2012 | $CO_2$, GDP, RE, NRE | ARDL, DOLS, FMOLS | Yes |
| Liobikiene and Butkus (2017) | 1990-2011 | $CO_2$, GDP, RE, $E_{effciency}$ | GMM | No |
| Liu et al. (2017) | 4 ASEAN 1970-2013 | $CO_2$, GDP, RE, NRE, Agriculture | DOLS, FMOLS | No |
| Moutinho et al. (2017) | 2 Countries 1975-2012 | $CO_2$, GVA, EC | Panel corrected standard error | Yes |
| Mrabet and Alsamara (2017) | Qatar 1980-2011 | EF, $CO_2$, GDP, TR, FD, EC | ARDL | EF → Yes<br>$CO_2$ → No |
| Wang et al. (2017) | China 2000-2013 | $CO_2$, GDP, POP, $EC_{EI}$ | Semi parametric Panel regression | Yes |
| Churchill et al. (2018) | 20 OECD 1870-2014 | $CO_2$, GDP, TR, FD, POP | MG, PMG | Yes |
| Sarkodie and Strezov (2018) | 4 Countries 1971-2013 | $CO_2$, EF, GDP, EC, EI, $POP_{urb}$, $Bio_{cap}$ | PMG, ARDL | For 2 → Yes<br>For 2 → No |
| Zambrano et al. (2018) | Peru 1980-2011 | $CO_2$, GDP, $EC_{gas}$, $EC_{oil}$, RE | ARDL | No |
| Bese and Kalayci (2019) | 3 countries 1960-2014 | $CO_2$, GDP, EC | ARDL | No |
| Destek and Sarkodie (2019) | 11 countries 1977-2013 | EF, GDP, EC, FD | AMG | Yes |
| Hi and Lin (2019) | China 2003-2017 | $CO_2$, GDP, EI, IS, $ENV_{regulation}$ | Panel smooth transition regress | Yes |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Hove and Tursoy (2019) | 24 countries 2000-2017 | $CO_2$, $NO_2$, GDP, EC, Credit, RE | GMM | No |
| Lau et al. (2019) | 18 OECD 1995-2015 | $CO_2$, GDP, $EL_{nuclear}$, $EL_{renewable}$ | GMM, FMOLS | Yes |
| Ridzuan (2019) | 170 countrys 1991-2010 | $SO_2$, GDP, POP, TR, Corruption | OLS | Yes |
| Saqib and Benhmad (2021) | Meta-analysis | $CO_2$, $SO_2$, GDP, POP, TR, EC, EF | Multinomial Logistic regression | Yes |
| GDP= Gross Domestic Product<br>TR= Trade/International Trade<br>FDI= Foreign Direct Investment<br>NRE= Non-Renewable Energy<br>FD= Financial Development | | | EC= Energy Consumption<br>RE= Renewable Energy<br>IS= Industry Share<br>POP= Population<br>EI= Energy Intensity | |

Le tableau 2.1 montre qu'un grand nombre d'études empiriques menées dans différentes régions du monde montrent l'importance de la relation EKC et ses implications politiques.

Le fait que la littérature empirique n'ait pas abouti à une même conclusion sur l'existence de EKC nous amène à poser la question sur la relation EKC. S'agit-il d'un mythe ou d'une réalité ?

Une grande partie de la littérature a validé empiriquement cette relation et soutient qu'elle peut être utilisée pour toutes les implications politiques (Dinda et Coondoo 2006 ; Jalil et Mahmud 2009 ; Iwata et al. 2010 ; Pao et Tsai 2010 ; Tamazian et Rao 2010 ; Saboori et al. 2012 ; Arouri et al. 2012 ; Shahbaz et al. 2013 ; Tiwari et al. 2013 ; Lau et al. 2014 ; Apergis et Ozturk 2015 ; Ahmed et al. 2016 ; Li et al. 2016 ; Ali et al. 2017 ; Moutinho et al. 2017 ; Churchill et al. 2018 ; Pata 2018 ; Hi et Lin 2019 ; Lau et al. 2019 ; etc.).

À l'opposé, certaines études rejettent même cette relation quadratique pour certaines raisons et affirment qu'aucune politique publique ne devrait être basée sur cette relation.

Toute politique fondée sur ces hypothèses peut ne pas être applicable dans le monde réel (Pao et al. 2011 ; Lau et al. 2014 ; Begum et al. 2015 ; Jebli et Youssef 2015 ; Al Mulali et al. 2015 ; Azam et Khan 2016 ; Dogan et Turkekul 2016 ; Zhu et al. 2016 ; Ali et al. 2017 ; Aye et Edoja 2017 ; Liu et al. 2017 ; Zambrano et al. 2018 ; Bese et Kalayci 2019 ; Hove et Tursoy 2019 ; etc.).

Ces résultats contradictoires peuvent être dus à certaines raisons comme les méthodologies empiriques utilisées, les indicateurs environnementaux et la fiabilité des coefficients estimés. Plusieurs études ont employé différentes techniques économétriques telles que ARDL (Saboori et al. 2012 ; Boluk et Mert 2015 ; Alam et al. 2016 ; Danish et al. 2017 ; Mrabet et Alsamara 2017 ; Zambrano et al. 2018), GMM (Tamazian et Rao 2010 ; Omri et al. 2015 ; Ozturk et Al Mulali 2015 ; Li et al. 2016 ; Liobikiene et Butkus 2017 ; Lau et al. 2019), MG/AMG/PMG (Ahmed et al. 2016 ; Churchill et al. 2018 ; Sarkodie et Strezov 2018) et DOLS/FMOLS (Farhani et al. 2014 ; Jebli et al. 2016 ; Liu et al. 2017). Ce qui a conduit à un large éventail de résultats contradictoires.

D'autre part, différentes études utilisent une seule variable comme indicateur de la dégradation de l'environnement, comme le $CO_2$ pour la pollution atmosphérique (Dinda et Coondoo 2006 ; Iwata et al. 2010 ; Ahmad et al. 2017), le SO2 pour la pollution de l'eau (Fodha et Zaghdoud 2009 ; Ridzuan 2019) et les déchets industriels ou solides pour la dégradation biologique (Li et al. 2016 ; Adu et Denkyirah 2017 ; Su et Chen 2018). Mais le plus important est que de nombreuses études ne prennent pas en compte le problème fondamental des données statistiques, comme la dépendance transversale, dans le cas d'une analyse transnationale, et utilisent des tests de diagnostic et des approches d'estimation de première génération. Par conséquent, les résultats de l'analyse

ne peuvent être fiables que si une méthodologie d'estimation plus efficace est employée, ou que si certains contrôles de robustesse sont effectués.

Ainsi, dans le cadre de notre étude, nous avons essayé de dépasser les lacunes identifiées dans la littérature ci-dessus.

Tout d'abord, compte tenu du problème de la dépendance transversale, certaines techniques économétriques de deuxième génération ont été adoptées pour obtenir des résultats plus fiables. Deuxièmement, les indicateurs utilisés pour approximer la dégradation de l'environnement, (émissions de $CO_2$, $SO_2$ ou déchets solides) ne peuvent expliquer à eux seuls la pollution environnementale puisque la dégradation de l'environnement est un phénomène multidimensionnel.

En effet, selon Wackernagel et Rees (1998), la dégradation de l'environnement n'est pas seulement le résultat de l'émission continue de carbone, mais aussi de la diminution de la couverture forestière, de la réduction des pâturages et des cultures, et de la perte d'espèces halieutiques.

D'autre part, Khan et al. (2019) ont constaté que la diminution de la couverture forestière entraîne de nombreux effets néfastes tels que des crues soudaines, des courants d'air et des précipitations irrégulières, etc.

Troisièmement, la littérature manque d'une étude qui a été faite pour la région européenne pour le problème susmentionné.

Destek et Sarkodie (2019) se sont penchés sur cette question et ont étudié le lien entre l'empreinte écologique avec la croissance économique pour 11 économies nouvellement industrialisées. Considérant le problème de la dépendance transversale, ils ont utilisé

l'estimateur du groupe moyen augmenté (AMG) et ont tiré la conclusion selon laquelle la courbe de Kuznets environnementale existe bien dans ces 11 pays.

Notre étude s'inspirant de celle de Destek et Sarkodie (2019), nous avons analysé la relation EKC pour 22 pays européens en utilisant l'empreinte écologique comme mesure de la dégradation de l'environnement. Des techniques économétriques plus efficaces telles que PMG et AMG ont été utilisées pour l'estimation des paramètres de long terme. Enfin, nous avons suivi Eren et al. (2019) pour effectuer une analyse de robustesse qui permet la validation nos résultats empiriques en employant DOLS et FMOLS qui fonctionnent efficacement en présence de dépendance croisée.

## 3. Le Modèle

Le modèle de base de la courbe de Kuznets environnementale stipule que la pollution environnementale est une fonction quadratique de la croissance du revenu. Suivant Bilgili et al. (2016), ceci peut être écrit comme suite :

$$E = f(y, y^2, z) \tag{2.1}$$

Où « E » est la variable dépendante qui mesure la pollution environnementale, « y » est la mesure de la croissance des revenus, tandis que « z » est l'ensemble de toutes les variables qui jouent un rôle significatif dans la détermination de la qualité de l'environnement. Si seule la croissance des revenus est utilisée comme variable explicative, il sera difficile d'étudier la nature multidimensionnelle de la dégradation de l'environnement (Destek et Sarkodie 2019).

La plupart des émissions de gaz à effet de serre (Green house gazes ou GHGs emission) est le résultat direct des activités économiques de l'homme, qui consomme de l'énergie. Par conséquent, le rôle de la croissance démographique et de la consommation d'énergie ne peut être ignoré et doit être inclus dans le modèle (Alam et al. 2016).

Le modèle devient donc :

$$E = f\,(y, y^2, ec, pop) \qquad (2.2)$$

Dans l'équation ci-dessus :

- « E » désigne l'empreinte écologique (EF) et est mesurée en hectares globaux selon les réseaux d'empreinte écologique. L'empreinte écologique peut être définie comme la demande humaine globale placée sur la biosphère/biocapacité. Si l'empreinte écologique dépasse la biocapacité, nous sommes en déficit écologique, tandis que si elle est inférieure à la biocapacité, on parle de réserves écologiques. L'empreinte écologique a été mesurée en hectares globaux.
- Le « *PIB* » est remplacé par « *y* » et est mesuré en billions de dollars US constants de 2010,
- « *POP* » représente la population et est mesurée en millions de personnes vivant dans un pays,
- « *EC* » est la consommation d'énergie primaire et mesurée en millions de tonnes d'équivalent pétrole.

La forme de régression finale du modèle peut être écrite comme suite :

$$EF_{it} = \alpha_{it} + b_1\,(GDP_{it}) + b_2\,(GDP_{it})^2 + b_3\,(EC_{it}) + b_4\,(POP_{it}) + e_{it} \qquad (2.3)$$

Où « $\alpha_{it}$ » est l'intercept, « $b_1$ » est le coefficient de la croissance du revenu et devrait avoir un signe positif ($b_1 > 0$) tandis que « $b_2$ » est le coefficient du carré de la croissance du revenu et devrait avoir un signe négatif ($b_2 < 0$) selon la théorie de l'EKC. De la même manière, « $b_3$ » et « $b_4$ » sont les coefficients de la consommation d'énergie et de la population et on s'attend à ce que les signes soient positifs pour les deux ($b_3$, $b_4 > 0$).

# 4. Données et méthodologie d'estimation

## 4.1. Description des données

L'Union européenne, qui est la région économiquement la plus intégrée au monde, occupe une place importante dans ce domaine. La loi européenne sur le climat vise à atteindre une émission nette de gaz à effet de serre nulle d'ici 2050 en réduisant les émissions de carbone, en encourageant les technologies vertes et en protégeant l'environnement naturel. On parle de neutralité carbone.

Pour atteindre cet objectif, les États membres visent à augmenter la part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie. Cela nécessitera un investissement de près de 1,5% du PIB par an, ce qui constitue un véritable défi. Afin d'atteindre les objectifs de réduction des émissions de GHGs , les pays de l'union européenne devront abandonner les technologies de production d'énergie conventionnelles ( charbon, gaz naturel, pétrole etc.) et réorienter leur structure de production d'énergie vers des technologies vertes (éolien, solaire etc.). Cela risquerait d'entraîner une réduction temporaire du PIB de l'UE. Malgré l'accélération actuelle de cette politique de transition énergétique, la réalisation de ces objectifs semble très lente et très difficile. Il y a donc une nécessité absolue d'étudier le lien entre la croissance économique et la qualité de l'environnement de l'union européenne (UE) en utilisant des outils et des techniques économétriques suffisamment robustes.

Pour atteindre les objectifs de cette étude, nous avons recueilli des données annuelles pour 22 pays européens (par exemple, l'Autriche, la Belgique, la Croatie, la République tchèque, le Danemark, l'Estonie, la France, l'Allemagne, la Grèce, l'Italie, la Lettonie, la Lituanie, le Luxembourg, la Macédoine, les Pays-Bas, la Pologne, le Portugal, la Roumanie, la Slovaquie, la Slovénie, l'Espagne et la Suède). Les données relatives aux

empreintes écologiques proviennent du Global Footprint Network 2019. Tandis que les données relatives au produit intérieur brut, à la population et à la consommation d'énergie ont été tirées du World Developement Indicator 2018.

Dans l'équation ci-dessus, :

- L'empreinte écologique (EF) et est mesurée en hectares globaux.
- Le « *PIB* » est mesuré en billions de dollars US constants de 2010.
- La « *POP* » représente la population mesurée en millions d'habitants.
- La consommation d'énergie primaire et est mesuré mesurée en millions de tonnes d'équivalent pétrole.

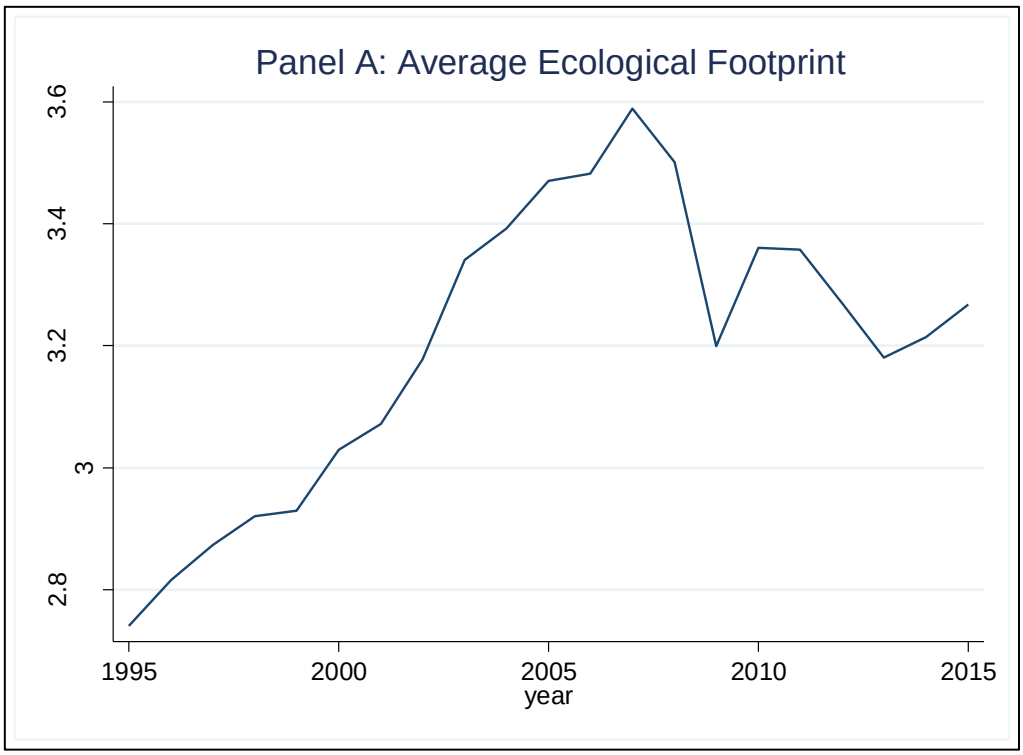
Le tableau 2.2 résume les statistiques descriptives de nos données de panel utilisées pour l'analyse. La valeur minimale de l'empreinte écologique est de 1,28 et la valeur maximale de 9,88, tandis que l'écart type est de 1,35. L'écart-type de l'empreinte écologique est assez faible et ne montre aucune différence significative entre les individus du panel.

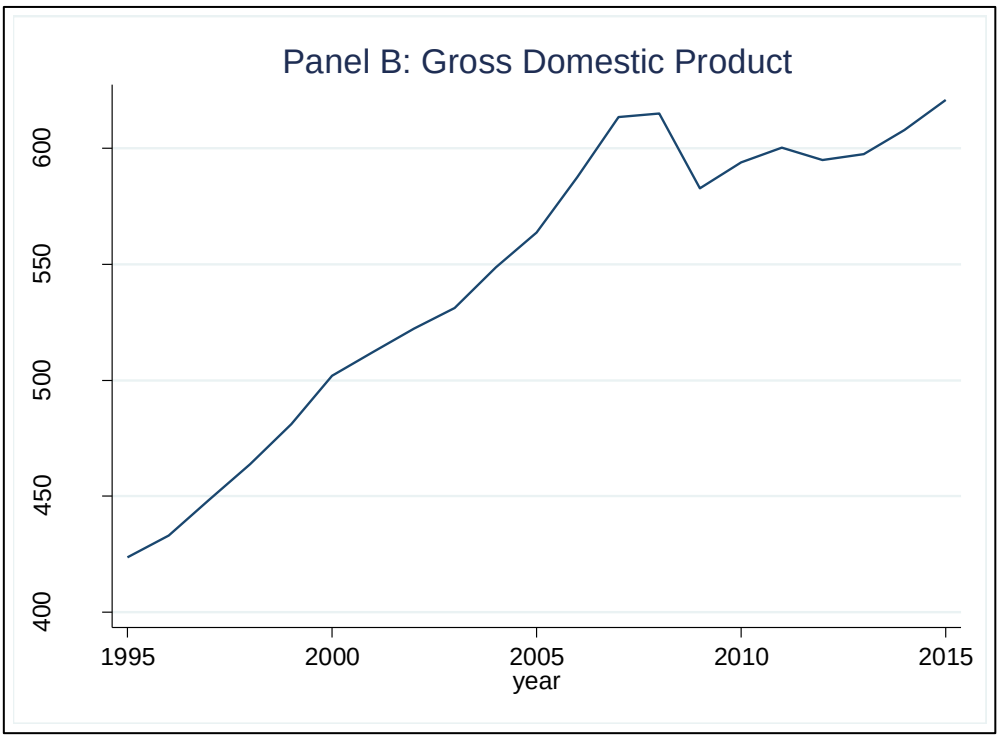
**Tableau 2.2 : Statistique Descriptives**

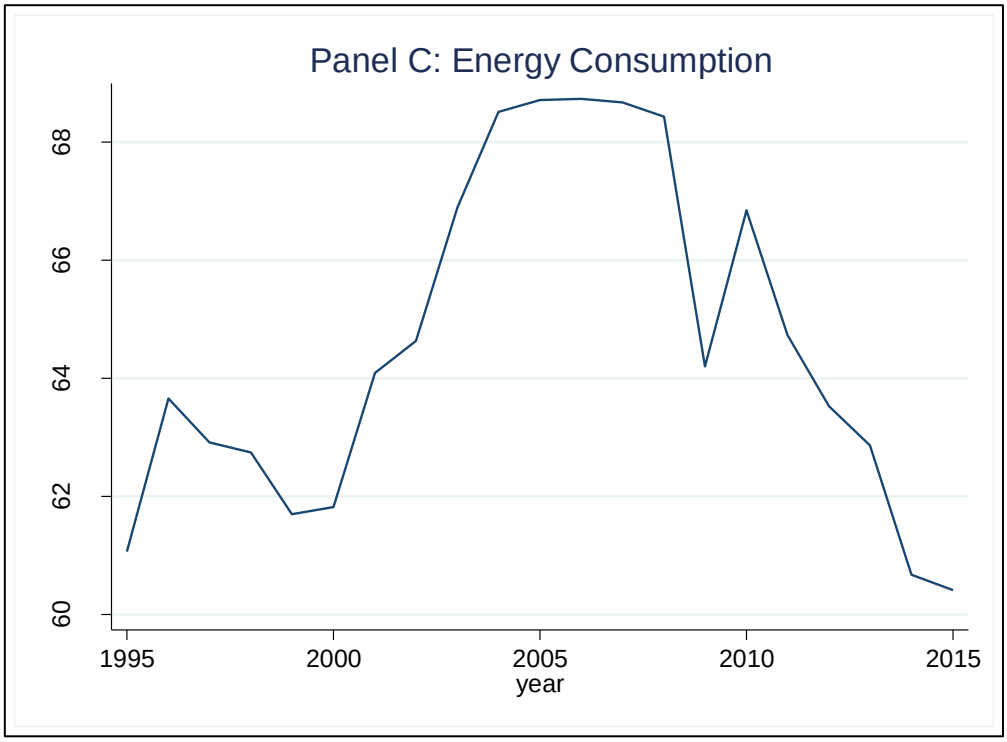
| Variables | Observations | Mean | Std. Dev. | Minimum | Maximum |
|---|---|---|---|---|---|
| **EF** | 462 | 3.199201 | 1.355133 | 1.286639 | 9.882354 |
| **GDP** | 462 | 29299.27 | 21654.34 | 3056.985 | 111968.3 |
| **EC** | 462 | 3.476521 | 1.499752 | 1.233482 | 9.428811 |
| **POP** | 462 | 18.57248 | 22.65233 | .408625 | 82.53418 |

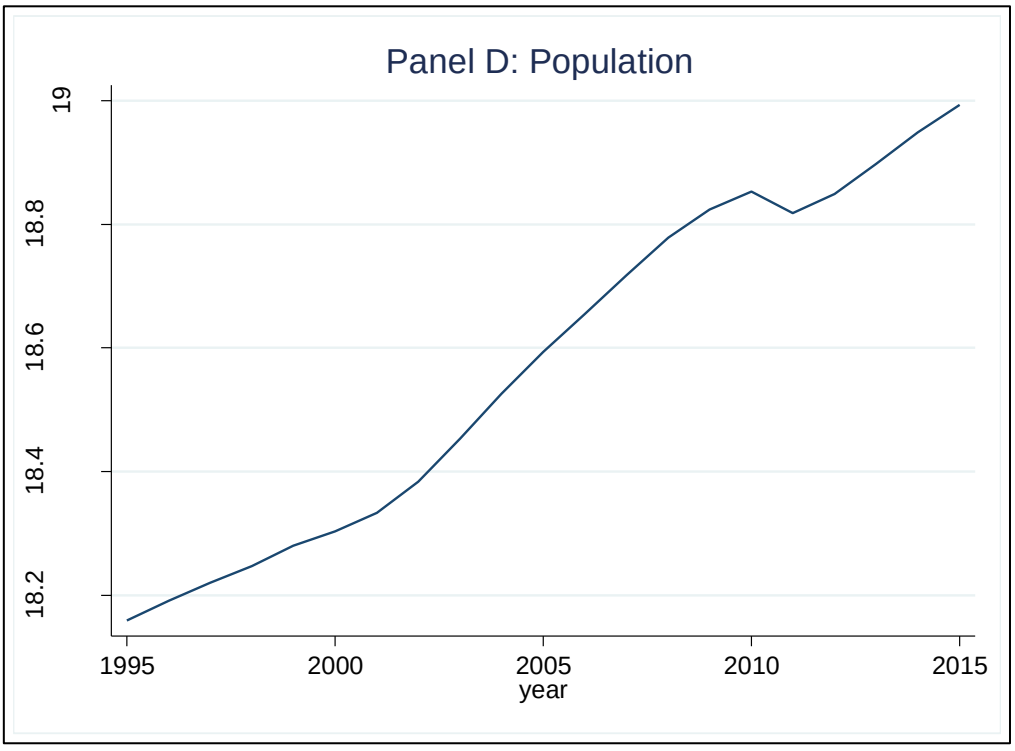
La consommation d'énergie a une valeur minimale de 1,23 et maximale de 9,42 millions de tonnes d'équivalent pétrole avec un écart type de 1,49 millions de tonnes d'équivalent pétrole. Les pays européens présentent une grande variation du PIB et de la population avec un écart type de 21654 et 22,65 respectivement. Cette énorme différence entre les PIB des nations membres peut provoquer l'existence de l'EKC dans le pays.

**Figure 2.1 : Tracé des séries temporelles des variables**






La figure 2.1 illustre l'évolution de toutes les variables de l'équation 2.3.

Le panneau « A » de la figure illustre l'empreinte écologique moyenne (EF) des pays européens. On constate que l'empreinte écologique augmente à un rythme élevé jusqu'en

2007, puis diminue jusqu'en 2010, avant de s'aplanir jusqu'en 2015. L'augmentation de l'empreinte écologique signifie que la pression sur la biosphère/biocapacité augmente et que la qualité de l'environnement se dégrade. Selon le réseau mondial de l'empreinte écologique, sur les 22 pays d'Europe, seuls trois États membres (Estonie, Lettonie et Suède) faisaient partie des réserves écologiques en 2015. Globalement, le monde était en réserve écologique avant 1970, alors qu'il a toujours été en déficit écologique par la suite, et ce déficit s'aggrave de jour en jour.

Si l'on regarde le panneau « D » de la figure, la population augmente de façon continue et exerce une pression sur la biocapacité, ce qui aggrave le déficit écologique.

Le PIB a été illustré dans le panneau « B » de la figure 2.1. On peut observer une croissance économique continue, malgré le choc entre 2008- 2010 (crise des subprimes), qui exerce une pression sur les ressources naturelles. Cette croissance économique des revenus par tête a été des subprimes couplés à une demande d'énergie plus élevée, comme le montre le panneau « C ». En effet, jusqu'en 2005, la demande d'énergie a une tendance à la hausse en Europe, alors qu'elle présente des fluctuations par la suite.

Cette légère baisse de la consommation d'énergie peut être due à l'efficacité énergétique et à l'utilisation de technologies de production d’énergie plus vertes.

### 4.2. Dépendance transversale

L'Union européenne est considérée comme une région économiquement intégrée de premier plan et constitue un exemple unique dans l’histoire de la mondialisation. Il existe donc une possibilité d'effets de débordement entre les pays membres de la région. Il est possible d'avoir des résultats erronés des coefficients si le modèle empirique a été estimé en présence de ce problème (Pesaran 2007 ; Dogan et Seker 2016).

L'une des limites de la littérature disponible est que de nombreux chercheurs (par exemple, Dinda et Coondoo 2006 ; Shafiei et Salim 2014 ; Boluk et Mert 2014 ; etc.) n'ont pas pris en compte ce problème lorsqu'ils utilisent des ensembles de données de panel. Pour étudier ce problème, il convient d'utiliser un test d'indépendance transversale de panel (Rasoulinezhad et Saboori 2018). Pour cette raison, nous effectuerons le test résiduel de dépendance transversale (CD) de Pesaran (2004) lorsque « N » est grand et « T » est petit.

Ce test est basé sur des coefficients de corrélation par paire ayant la forme mathématique suivante :

$$CD = \sqrt{\frac{2T}{N(N-1)}} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} \rho ij \qquad (2.4)$$

Ce test est censé donner des résultats plus robustes pour un petit échantillon lorsque « *N* » et « *T* » sont petits. Le test de dépendance transversale fournit des lignes directrices pour utiliser le test de racine unitaire de panel approprié. En présence d'une dépendance transversale, on ne peut pas utiliser les tests de racine unitaire conventionnels de première génération ainsi que les techniques de cointégration et d'estimation des paramètres à long terme (Shafiei et Salim 2014). Le tableau 2.3 fournit les résultats de Pesaran (2004) et rejette complètement l'hypothèse nulle d'indépendance transversale. Par conséquent, pour la suite de l'analyse, nous avons adopté tous ces outils et techniques qui donnent des résultats robustes même en présence de dépendance transversale.

**Tableau 2.3 : Résultat du test de Pesaran (2004)**

| Variables | EF | GDP | GDPS | EC | POP |
|---|---|---|---|---|---|
| **CD-test** | 33.731 | 58.053 | 56.731 | 23.653 | 4.992 |
| **P-value** | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

### 4.3.Test de racine unitaire en panel

En présence d'une dépendance transversale, les tests de racine unitaire conventionnels de première génération ne sont pas efficaces. On a donc utilisé les tests de racine unitaire de deuxième génération Cross Sectionally Augmented Dickey-Fuller (CADF) et Cross Sectionally Augmented IPS (CIPS). Pesaran (2007), a proposé ce test alternatif qui est la forme augmentée du test standardisé avec la première différence de chaque série et les moyennes transversales des niveaux retardés. Le test de racine unitaire du panel peut être écrit sous la forme suivante ;

$$\Delta y_{it} = \pi_i + \beta_i y_{it-1} + \omega_i T + \sum_{j=1}^{n} \theta_{ij} \Delta y_{it-j} + \mu_{it} \qquad (2.5)$$

Où, « Δ » est l'opérateur de différence, « $y_{it}$ » désigne la variable à étudier, « $\mu_{it}$ » est le terme d'erreur, « $\pi$ » est l'intercept et « $T$ » est la tendance temporelle. Le critère d'information de Schwarz sera utilisé pour sélectionner la longueur optimale du retard. L'hypothèse nulle du test indique que toutes les variables incluses sont non stationnaires contre l'hypothèse alternative qu'au moins une variable est stationnaire :

$$\boldsymbol{H_o : \beta_i = 0}$$

$$\boldsymbol{H_a : \beta_i < 0} \qquad ou\ i=1,2,3\ldots n$$

### 4.4. Cointégration en panel

Un test de cointégration est utilisé afin d'analyser l'existence ou l'absence éventuelle d'une relation dynamique à long terme entre les variables sélectionnées (Liu et al. 2017).

En suivant Jebli et Ozturk (2016), nous avons fait appel au test de cointégration de Pedroni (1999, 2004) qui donne des résultats robustes en présence d'une éventuelle hétérogénéité et d'une dépendance transversale.

$$Y_{it} = \alpha_{it} + \delta_i t + \gamma_{it} X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (2.6)$$

Où $i = 1, 2, ....., N$ représente chaque section transversale et $t = 1, 2, ....., T$ est la série temporelle prise en considération. Les paramètres $\alpha_{it}$, $\delta_i$, $\gamma_i$ signifient respectivement l'effet fixe spécifique au pays, la tendance déterministe et les coefficients. Tandis que $\varepsilon_{it}$ est le terme d'erreur représente la déviation de la relation de long terme.

Pedroni (1999, 2004) propose deux séries de tests de cointégration basés sur les résidus. Premièrement, l'approche intra-dimensionnelle qui comprend quatre statistiques telles que : les statistiques v de panel, les statistiques rho- de panel, les statistiques pp de panel et les statistiques ADF de panel, et qui considère le résidu estimé autorégressif commun à toutes les sections transversales.

Deuxièment, l'approche dimension intermédiaire, composée de trois statistiques de groupe telles que : les statistiques rho, les statistiques pp et les statistiques ADF. Contrairement à la première, elle est basée sur les coefficients autorégressifs individuels pour chaque pays. Pour vérifier la robustesse des résultats du test de Pedroni, nous avons également appliqué le test de cointégration de Kao.

### 4.5. Paramètres de long terme

Comme mentionné précédemment, afin de traiter le problème de la dépendance transversale, nous avons suivi Ahmed et al. (2016) et Destek et Sarkodie (2019) et avons adopté les estimateurs Pooled Mean Group (PMG) et Augmented Mean Group (AMG). Les deux estimateurs ont l'avantage de donner des estimations efficaces en présence de dépendance transversale. La méthodologie PMG a été introduite par Pesaran et al. (1999) et est un type de modèle ARDL (Autoregressive Distributive Lag). L'estimateur PMG permet un ajustement à court terme, un ajustement hétérogène à long terme et des

estimations homogènes à long terme à travers le panel. Le coefficient à long terme du terme de correction d'erreur doit être négatif et significatif. D'autre part, l'estimateur AMG, développé par Eberhardt et Bond (2009), permet d'appréhender l'hétérogénéité spécifique au pays et la non-stationnarité des variables.

Une grande partie de la littérature empirique a pu estimer les coefficients du modèle sans pour autant être en mesure d'en vérifier la robustesse. Dans cette étude, pour vérifier la fiabilité des paramètres à long terme, nous avons effectué un contrôle de robustesse en utilisant les estimateurs Dynamic Ordinary Least Square (DOLS) et Fully Modified Ordinary Least Square (FMOLS).

Le DOLS est une estimation paramétrique qui élimine le problème de l'endogénéité et de la corrélation sérielle dans le terme résiduel. L'estimateur DOLS utilise les variables explicatives avancées et retardées, ce qui évite également le problème du biais lié aux petits échantillons. Il peut être utilisé lorsque les variables explicatives sont intégrées du même ordre ou intégrées d'un ordre mixte (Eren et al. 2019). Plus précisément, le DOLS est plus adapté à l'analyse dans le domaine de l'économie de l'énergie et de l'environnement (Al-Mulali et al. 2015). D'autre part, en utilisant des estimations non paramétriques, le FMOLS est un estimateur qui permet d'appréhender la présence de l'autocorrélation et de l'endogénéité.

### 4.6.Test de causalité

Après avoir obtenu les estimations à long terme, il est important de connaître la direction de la causalité entre les variables. Ceci est d'autant plus important que les résultats empiriques puissent avoir des implications en termes de recommandation de politiques publiques. C'est pour cela que nous utiliserons le test de Dumitrescu et Hurlin (2012) qui est basé sur les statistiques individuelles de Wald. L'un des avantages uniques de ce

test de causalité est qu'il prend en compte la dépendance transversale et l'hétérogénéité dans le panel de données. En outre, ce test peut être effectué si la dimension temporelle (T) est supérieure ou inférieure au nombre de sections transversales (N).

Soit « *x* » et « *y* » deux variables stationnaires observées pour N sections transversales et T périodes. Pour chaque valeur observée les sections transversales, i = 1, 2, ....., N et le temps t = 1, 2, ....., T, le test prend la forme linéaire suivante.

$$y_{it} = \alpha_i + \sum_{k=1}^{K} \gamma_i^{(k)} y_{i,t-k} + \sum_{k=1}^{K} \beta_i^{(k)} x_{i,t-k} + \varepsilon_{i,t} \qquad (2.7)$$

$$\beta_i = (\beta_i^{(1)}, \dots\dots\dots, \beta_i^{(k)})$$

Où $K \in N^*$et $\alpha_i$, $\gamma_i$, $\beta_i$ signifient respectivement le terme constant, l'opérateur de retard et le coefficient de pente pour chaque paramètre. L'hypothèse nulle du test suppose l'absence de causalité de panel homogène entre toutes les sections transversales tandis que l'alternative soutient l'existence d'au moins une relation causale de Granger entre le panel de données.

$$H_o: \beta_i = 0$$

$$H_1: = \begin{cases} \beta_i = 0 & \forall_i = 1, 2, 3, \dots\dots, N \\ \beta_i \neq 0 & \forall_i = N_1 + 1, N_1 + 2, \dots, N \end{cases}$$

Où $N_1$ est inconnu et satisfait à la condition ($0 \leq N_1/N < 1$). Si dans le cas de $N_1 = N$, cela signifie qu'il n'y a aucune causalité présente dans aucun panel et l'hypothèse nulle est acceptée. Si $N_1 = 0$, cela suppose qu'il existe une causalité homogène dans le panel, bien que le modèle de régression puisse ne pas être homogène car les estimations des paramètres varient selon les groupes. A l'inverse, si $N > 0$, on obtient une relation de causalité hétérogène.

Dumitrescu et Hurlin (2012) proposent l'utilisation de statistiques de Wald individuelles ($W_{N,T}^{Hnc}$) pour les unités *i=1, 2..... N*. Alors que la statistique de Wald moyenne associée à *HNC* nulle peut être définie comme suite :

$$W_{N,T}^{Hnc} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} W_{i,T} \qquad (8)$$

$W_{i,T}$ dans l'équation signifie les statistiques individuelles pour la nième unité transversale correspondant à l'hypothèse nulle individuelle $H_o : \beta i = 0$.

## 5. Les résultats empiriques

### *5.1. Test de racine unitaire*

La première étape de l'analyse empirique consiste à analyser les données pour détecter la présence éventuelle de racine unitaire. Le tableau 2.4 montre les résultats des tests de racine unitaire de deuxième génération utilisés.

Les colonnes 2 et 3 rapportent les coefficients estimés des tests IPS augmentés transversalement au niveau et à la 1ère différence respectivement. A l'exception de l'empreinte écologique, toutes les variables sont intégrées d'ordre *I*(1). De la même manière, les résultats du test Dickey Fuller augmenté en coupe transversale montrent également que toutes les variables sont non stationnaires en niveau mais stationnaires en différence première.

**Tableau 2.4: Les résultats des tests de CIPS et CADF**

| Variables | CIPS test | | CADF test | |
|---|---|---|---|---|
| | **Level** | **1st difference** | **Level** | **1st difference** |
| **EF** | -2.568*** | -5.182*** | -1.600 | -3.273*** |
| **GDP** | -1.298 | -2.489*** | -1.969 | -2.236** |
| **GDPS** | -1.047 | -2.607*** | -1.411 | -2.119** |
| **EC** | -1.755 | -4.558*** | -1.605 | -3.085*** |
| **POP** | -1.019 | -2.917*** | -1.804 | -2.031* |

### 5.2. Cointégration de panel

Les résultats de la cointégration de Pedroni sont présentés dans la partie supérieure du tableau 5. Tous les résultats, à l'exception de la statistique « v » de panel et de la statistique « v » de groupe, rejettent l'hypothèse nulle d'absence de relation de cointégration entre les variables des pays européens.

Puisque nos données peuvent présenter un problème de dépendance transversale, les résultats basés sur un seul test ne peuvent pas être fiables.

**Tableau 5.5: Les résultats des tests Pedroni and Kao**

| **1) Pedroni co-integration** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Alternative hypothesis: common AR coefs. (Within-dimension)** | | | | |
| | **Statistics** | **Probability** | **Weighted statistics** | **Probability** |
| **Panel ν-statistics** | -0.736407 | 0.7693 | Panel ν-statistics | 0.9851 |
| **Panel ρ-statistics** | -2.049054 | 0.0202 | Panel ρ-statistics | 0.0802 |
| **Panel PP-statistics** | -9.310422 | 0.0000 | Panel PP-statistics | 0.0000 |
| **Panel ADF-statistics** | -8.948742 | 0.0000 | Panel ADF-statistics | 0.0000 |
| **Alternative hypothesis: individual AR coefs. (Between-dimension)** | | | | |
| | **Statistics** | | **Probability** | |
| **Group ν-statistics** | -0.089232 | | 0.4644 | |
| **Group ρ-statistics** | -1473744 | | 0.0000 | |
| **Group PP-statistics** | -10.94102 | | 0.0000 | |
| **2) Kao co-integration** | | | | |
| | **t-statistics** | | **Probability** | |
| **ADF** | -3.835920 | | 0.0001 | |
| **Residual variance** | 0.062464 | | | |
| **HAC variance** | 0.033489 | | | |

Afin d'y remédier, nous avons également utilisé le test de cointégration de Kao et les résultats sont présentés dans la partie inférieure du tableau 5.5. Les statistiques du test confirment que toutes les variables incluses sont fortement cointégrées au niveau de significativité de 1%.

Globalement, les résultats des deux tests confirment l'existence d'une relation à long terme entre les variables du modèle et peuvent donc être utilisés pour la suite de notre analyse.

### 5.3.Paramètres de long terme

Après avoir confirmé l'existence d'une relation de long terme entre les variables (cointégration), nous allons effectuer une analyse de l'impact de la croissance des revenus, de la consommation d'énergie et de l'augmentation de la population sur l'empreinte écologique a été étudié.

Afin de réaliser cet objectif, nous faisons appel à des estimations du groupe moyen regroupé (PMG) et du groupe moyen augmenté (AMG). Les résultats empiriques de ces deux estimations à long terme sont présentés dans le tableau 2.6.

Les résultats de l'estimateur PMG montrent qu'il existe une relation positive entre le PIB et l'empreinte écologique et une relation négative entre le carré du PIB et l'empreinte écologique.

**Tableau 2.6: Les résultats de PMG et AMG**

| Variables | Pooled Mean Group estimates | | Augmented Mean Group estimates | |
|---|---|---|---|---|
| | **Coefficient** | **p-value (P>\|z\|)** | **Coefficient** | **p-value (P>\|z\|)** |
| **GDP** | .0765 | 0.000 | .0553 | 0.689 |
| **GDPS** | -.000314 | 0.000 | -.000602 | 0.494 |
| **EC** | .569 | 0.000 | .03351 | 0.012 |
| **POP** | -.0126 | 0.098 | -.353 | 0.603 |
| **Constant** | -.42731 | 0.037 | 4.60197 | 0.168 |

Les coefficients estimés pour les deux variables sont fortement significatifs au niveau de significativité de 1%. Cela met en évidence l'existence d'une relation quadratique entre la croissance des revenus et la dégradation de l'environnement.

Ce résultat empirique confirme bien l'existence d'une courbe de Kuznets environnementale pour les pays de l'union européenne et corrobore les conclusions de la littérature empirique (Shahbaz et al. 2013 ; Apergis et Ozturk 2015 ; Bilgili et al. 2016 ; Dogan et Seker 2016 ; Destek et Sarkodie 2019) selon lesquelles la qualité de l'environnement se détériore d'abord aux premiers stades de la croissance économique mais commence à s'améliorer dès qu'un seuil de revenu soit atteint.

De la même manière, la croissance des revenus est associée à une utilisation intensive des ressources énergétiques, ce qui entraîne directement une augmentation des émissions de carbone et de la pollution atmosphérique (Pao et Tsai 2010 ; Omri et al. 2015). Le coefficient de la consommation d'énergie est positif et statistiquement significatif au niveau de 1%, ce qui confirme que la consommation d'énergie entraîne une détérioration de la qualité de l'environnement.

Ces résultats confirment également les conclusions de Jalil et Mahmud (2009) ; Zhang et Cheng (2009) ; Arouri et al. (2012) ; Farhani et al. (2014) et Al-mulali et al. (2015).

En ce qui concerne la croissance de la population, elle doit théoriquement avoir un effet négatif sur la qualité de l'environnement et provoquer une augmentation de la pollution. En effet, l'augmentation de la population donne naissance à un développement de différents types d'activités humaines qui ont un effet considérable sur la hausse des émissions des GES dans l'atmosphère (Zhang et Cheng 2009 ; Ahmed et Long 2012 ; Sohag et al. 2017 ; Isik et al. 2019).

Concernant les résultats de notre analyse, nous avons constaté que le coefficient de population apparaît négatif. Mais en même temps il n'est pas significatif ce qui nous indique que la croissance de la population pour notre échantillon n'a pas de rôle significatif dans la détermination de l'empreinte écologique en Europe.

Quant aux résultats de l'estimateur AMG qui figurent dans les colonnes 6 et 7, ils mettent en évidence que le coefficient du la croissance du PIB est liée positivement à l'empreinte écologique, tandis que le coefficient du carré de la croissance du PIB lui est lié négativement. Ce qui confirme la relation en forme de « U » inversé entre la croissance économique et la qualité de l'environnement.

Bien que les valeurs de probabilité des deux variables semblent statistiquement non significatives, elles sont en quelque sorte parallèles à celles de Begum et al. (2015) pour la Malaisie et d'Azam et Khan (2016) pour les États-Unis, qui ont obtenu les mêmes résultats.

Le coefficient de la consommation d'énergie est également lié positivement à l'empreinte écologique et semble significatif. Cette preuve confirme que si nous augmentons la consommation d'énergie, cela entraînera une augmentation de l'empreinte écologique. Cela peut être interprété comme le fait qu'une demande énergétique plus élevée entraînera une pression plus forte sur les ressources naturelles mondiales et donc une détérioration de la qualité environnementale (Alam et al. 2016 ; Azam et Khan 2016 ; Sohag et al. 2017).

Le coefficient de la population est statistiquement non significatif. Cela soutient que la population ne joue pas un tel rôle dans la détermination du niveau de pollution ou de la qualité de l'environnement au sein de l'union européenne. Les résultats sont similaires à ceux d'Iwata et Okada (2010), et de Alam et al. (2016) qui ont trouvé que la population ne joue pas un rôle significatif par rapport à la croissance des revenus et à la consommation d'énergie.

Quoi qu'il en soit, la croissance démographique s'est révélée insignifiante pour déterminer la qualité de l'environnement. Il est fort vraisemblable que la croissance

démographique au niveau de l'union européenne soit sous contrôle et ne constitue plus une grande menace pour la qualité de l'environnement en comparaison avec d'autres facteurs.

Mais, comme nous disposons d'un panel de 22 pays européens dont chacun d'eux a sa propre structure économique et sa propre dynamique d'émission des gaz à effet de serre, l'impact sur la qualité de l'environnement des différentes variables pourrait être très hétérogène.

Il est donc important d'étudier la nature spécifique de chaque pays des relations entre le revenu et l'environnement. Les estimateurs PMG et AMG ont la propriété unique d'estimer les coefficients transversaux individuels à long terme et donc de faciliter l'analyse des caractéristiques spécifiques des différents pays composant le panel (Churchill et al. 2018).

Le tableau 2.7 suivant illustre les coefficients estimés de notre modèle par l'estimateur de groupe à moyenne augmentée.

**Tableau 2.7: Résultats spécifiques par pays**

| Cross Section | GDP | GDPS | EC | POP | CONSTANT |
|---|---|---|---|---|---|
| Austria | -.52*** | .0065*** | .812*** | .0960 | 9.7913** |
| Belgium | .2756 | -.00240 | .0837 | -.257 | -.82266 |
| Croatia | .4161 | -.00917 | .371 | .597 | -4.9603 |
| Czechia | .0845 | -.00056 | .8189** | -.183 | .51835 |
| Denmark | -.0555 | .00117 | -.457*** | -2.7*** | 20.437*** |
| Estonia | .8605 | -.0263 | .0237 | 4.41 | -8.5802 |
| France | -.5174 | .00773 | .562** | -.0310 | 10.979 |
| Germany | .0393 | -.00025 | .297 | -.0739 | 6.7025** |
| Greece | .0989 | -.00069 | 1.0921** | -.0696 | 5.8550 |
| Italy | .4797 | -.00612 | .674*** | .0728*** | -12.525 |
| Latvia | -.2556 | .0244** | -1.869*** | -2.36* | 11.637*** |
| Lithuania | -.157 | .00789** | .334** | -2.4*** | 10.562*** |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Luxembourg | .421** | -.0022** | .2491 | 7.72 | -17.033** |
| Macedonia | 1.883** | -.182* | .7066** | -2.61 | 1.6637 |
| Netherlands | -.3441 | .00455** | .3156 | 31.56 | 6.9931 |
| Poland | .379*** | -.015*** | .9746*** | .101 | -5.9325 |
| Portugal | -1.575*** | .038*** | .9264*** | -.159 | 17.810*** |
| Romania | .0744 | .0286 | .3607 | .115 | .20062 |
| Slovakia | .0109 | .00420 | .4527 | -1.02** | 54.772** |
| Slovenia | -.0812 | .00507** | -.1652 | -1.16 | 5.2062 |
| Spain | -.648*** | .013*** | .7378** | -.0693** | 11.483*** |
| Sweden | .3534 | -.00407 | .0698 | 2.14** | -23.515* |

(*, **, *** indiquent la signification à 10, 5 et 1 pour cent respectivement.)

Les résultats mettent en évidence qu'il y a onze pays (Belgique, Croatie, République tchèque, Estonie, Allemagne, Grèce, Italie, Luxembourg, Macédoine, Pologne, Suède) qui montrent une relation en forme de « U » inversé et qui confirment l'existence d'une relation EKC. Ces onze pays représentent presque la moitié de l'échantillon analysé.

A l'opposé, la relation est soit sous forme de « U », soit en augmentation monotone. En effet, une relation sous forme de U est observée chez les pays où l'intensité énergétique est plus élevée et où l'efficacité énergétique est plus faible. Ce qui confirme les résultats de Sarkodie et Strezov (2019).

Sur la base de ces résultats, nous pouvons affirmer que la lutte contre la dégradation de l'environnement ne constitue pas un défi qui pourrait être relevé par d'un seul pays, mais qu'il s'agit d'un défi qui nécessite des efforts collectifs de la part de tous les pays appartenant à toutes régions du monde. Il s'agit d'un défi global. Avec l'industrialisation rapide qui s'est accompagnée d'une consommation intensive de l'énergie, en particulier des énergies fossiles, la qualité de l'environnement s'est gravement dégradée, et l'empreinte écologique a été largement affectée.

### 5.4.Analyse de Robustesse

Bien que les estimations à long terme de notre modèle soient le résultat de deux estimateurs plus performants, nous effectuons un contrôle de robustesse qui nous permet de valider nos résultats empiriques (Ahmad et al. 2017).

Pour atteindre cet objectif, nous nous inspirons des travaux de Begum et al. (2015), Danish et al. (2017), et d'Eren et al. (2019), en faisant appel aux estimateurs des moindres carrés ordinaires dynamiques (DOLS) et des moindres carrés ordinaires entièrement modifiés (FMOLS).

Les résultats issus de l'estimation de notre modèle par les DOLS et les FMOLS figurent au niveau du tableau 2.8 suivant :

**Tableau 2.8: Les résultats de DOLS et FMOLS**

| | **DOLS estimates** | | | **FMOLS estimates** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Variables** | **Coefficient** | **S.E.** | **p-value** | **Coefficient** | **S.E.** | **p-value** |
| **GDP** | 0.187 | .03 | 0.000 | 0.109 | .00740 | 0.000 |
| **GDPS** | -.00133 | .00017 | 0.000 | -.00048 | .000058 | 0.000 |
| **EC** | 0.466 | 0.11 | 0.000 | 0.459 | .0503 | 0.000 |
| **POP** | .0274 | .046 | 0.553 | -.0231 | .0161 | 0.151 |

Les résultats du modèle estimé grâce aux estimateurs DLOS et FMLOS confirment les résultats obtenus par les estimateurs utilisés dans les sections précédentes. En particulier, la relation en forme de « U » inversé est confirmée pour les onze pays européens considérés.

En effet, les coefficients estimés pour le PIB sont non seulement positifs mais fortement significatifs au niveau de 1% pour les deux estimateurs.

De même, les coefficients du carré du PIB sont négatifs et significatifs au niveau de 1%, ce qui confirme que la qualité de l'environnement subit une large dégradation au cours

des premières étapes du développement économique, mais qu'une fois un seuil de revenu soit atteint, on observe une nette amélioration avec la croissance du revenu. En effet, la sortie de la pauvreté ou de la faiblesse du revenu nationale se fait au détriment de la qualité de l'environnement (Khan et al. 2019), mais au-delà d'un certain seuil de revenu, les gens ont suffisamment de revenus pour payer de meilleurs services environnementaux. En outre, l'économie a le potentiel de s'offrir des technologies plus avancées, plus efficaces et plus respectueuses de l'environnement.

Puisque la consommation d'énergie joue un rôle important dans la détermination de la valeur réelle de la qualité de l'environnement, il convient alors d'accorder plus d'attention à ce que son utilisation soit plus efficace et moins polluante. Le coefficient estimé de la consommation d'énergie est également confirmé comme ayant une relation positive et significative avec l'empreinte écologique. D'autre part, le coefficient de la population a un signe positif mais n'est pas significatif. On peut donc en conclure que la croissance de la population de l'union européenne ne constitue pas une menace aussi importante pour l'environnement que les autres facteurs.

### 5.5. Analyse de causalité

L'estimation des paramètres à long terme fournit des inférences significatives qui peuvent être utilisées pour les implications politiques. Cependant, ces estimations ne fournissent aucune information concernant la direction de la causalité entre les variables. D'un point de vue politique, il est important de savoir ce qui cause quoi (Dogan et Seker 2016).

À cette fin, nous avons employé le test de non-causalité en panel de Dumitrescu et Hurlin (2012) pour détecter la direction de la causalité entre les variables incluses dans notre modèle. Les Résultats du test sont présentés dans le tableau 2.9 ci-dessous. Une

valeur de probabilité significative entraînera le rejet de l'hypothèse nulle et nous conclurons qu'une variable cause une autre variable.

Les résultats du test de causalité montrent que le PIB cause l'empreinte écologique, cependant, d'autre part, aucune causalité inverse n'a été trouvée. Ce type de résultat a également été trouvé par Ali et al. (2017) ; Aye et Edoja (2017) ; pour l'émission de carbone. Ils ont en outre soutenu qu'il est possible de découpler la croissance du PIB de l'émission de carbone.

**Table 2.9: Dumitrescu-Hurlin Panel Causality Test results**

| Null Hypothesis ($H_0$) | W-statistics | Z-statistics | P-value |
|---|---|---|---|
| GDP does not homogeneously cause EF | 3.41960 | 1.84546 | 0.065 |
| EF does not homogeneously cause GDP | 1.54016 | -1.34752 | 0.177 |
| GDPS does not homogeneously cause EF | 2.80083 | 0.79424 | 0.427 |
| EF does not homogeneously cause GDPS | 1.58276 | -1.27515 | 0.202 |
| EC does not homogeneously cause EF | 6.47050 | 7.02867 | 0.000 |
| EF does not homogeneously cause EC | 4.45389 | 3.60264 | 0.000 |
| POP does not homogeneously cause EF | 4.05539 | 2.92562 | 0.003 |
| EF does not homogeneously cause POP | 7.23633 | 8.32975 | 0.000 |
| GDPS does not homogeneously cause GDP | 3.59117 | 2.13695 | 0,032 |
| GDP does not homogeneously cause GDPS | 3.39475 | 1.80326 | 0.071 |
| EC does not homogeneously cause GDP | 1.96876 | -0.61939 | 0.535 |
| GDP does not homogeneously cause EC | 4.64225 | 3.92264 | 0.000 |
| POP does not homogeneously cause GDP | 3.07465 | 1.25943 | 0.207 |
| GDP does not homogeneously cause POP | 10.2875 | 13.5134 | 0.000 |
| EC does not homogeneously cause GDPS | 2.02315 | -0.52697 | 0.598 |
| GDPS does not homogeneously cause EC | 4.60653 | 3.86196 | 0.000 |
| POP does not homogeneously cause GDPS | 3.67059 | 2.27189 | 0.023 |
| GDPS does not homogeneously cause POP | 10.0001 | 13.0251 | 0.000 |
| POP does not homogeneously cause EC | 6.82578 | 7.63227 | 0.000 |
| EC does not homogeneously cause POP | 6.85586 | 7.68336 | 0.000 |

Nos résultats illustrent que si des mesures prises pour améliorer la qualité de l'environnement n'affecteront pas le niveau de croissance économique.

D'autre part, une causalité bidirectionnelle entre la consommation d'énergie, la croissance démographique et l'empreinte écologique a été détectée. On peut en conclure que les variables dépendantes et indépendantes se causent mutuellement.

## 6. Conclusion

La présente étude a examiné de manière empirique la courbe de Kuznets environnementale pour 22 pays européens au cours de la période allant de 1995 à 2015. Nous avons pris l'empreinte écologique comme mesure de la qualité de l'environnement qui prend en compte non seulement les émissions de $CO_2$ mais aussi la déforestation, la réduction des pâturages et des cultures, et la perte d'espèces de poissons. Les données ont été examinées pour détecter un éventuel problème de dépendance transversale à l'aide du test CD de Pesaran (2004).

En présence d'une dépendance transversale dans le panel, des tests de racine unitaire de deuxième génération, IPS augmenté transversalement et ADF transversalement, ont été utilisés pour vérifier l'ordre d'intégration. Pour vérifier si la relation de long terme est présente ou non, les tests de cointégration de Pedroni (2007) et de Kao (1999) ont été utilisés.

Les paramètres de long terme ont été estimés à l'aide d'estimateurs de groupe de moyenne commune (PMG) et de groupe de moyenne augmentée (AMG), tandis que la robustesse des résultats est confirmée par des techniques de moindres carrés ordinaires dynamiques (DOLS) et de moindres carrés ordinaires entièrement modifiés (FMOLS).

Les résultats de l'étude ont montré qu'il existe une relation quadratique entre la croissance des revenus et la qualité de l'environnement. Au cours des premières étapes de la croissance des revenus, l'environnement est affecté négativement et la pollution de

l'air, de l'eau, de la terre, etc. apparaît, associée à la déforestation. Cela s'explique par le fait qu'au début, de plus en plus de ressources sont nécessaires pour alimenter le processus de croissance économique.

D'autre part, avec un faible niveau de revenu, il est également inabordable d'engager des technologies avancées et d'investir davantage dans les préoccupations environnementales. Mais une fois qu'un seuil de revenu soit atteint, des effets positifs apparaissent sur l'environnement avec une nouvelle augmentation du revenu. Cela s'explique par le fait que l'économie a le potentiel de s'offrir des technologies plus avancées et plus efficaces et que les gens sont relativement disposés à payer pour un environnement plus propre.

Tout au long de l'analyse, la consommation d'énergie est apparue comme ayant des effets négatifs sur la qualité de l'environnement, car elle contribue directement aux émissions des GES et à la pollution atmosphérique.

Alors que la croissance démographique ne joue pas un rôle significatif dans la détermination de la valeur réelle de la qualité de l'environnement au sein de l'union européenne. Cela indique que la croissance démographique n'est pas un problème aussi grave comme c'est le cas au niveau des économies des pays en développement.

Les estimations à long terme de l'étude sont validées par une analyse de robustesse en employant des estimateurs beaucoup plus performants (DOLS, FMOLS).

Enfin, l'analyse de causalité indique également qu'il existe une causalité unidirectionnelle entre le PIB et l'empreinte écologique et une causalité bidirectionnelle entre la consommation d'énergie et l'empreinte écologique.

Les résultats de cette étude ont des implications importantes.

- Tout d'abord, le modèle de consommation d'énergie devrait être modifié afin d’éviter une augmentation des émissions de GES importantes et la pollution atmosphérique. Les économies devraient se détourner des sources d'énergie fossiles conventionnelles (gaz naturel, charbon, pétrole…) au profit de sources utilisant des technologies plus vertes ( éolien, solaire…). Cela nécessitera des investissements très importants dans les technologies d'énergies renouvelables et un arrêt progressif de la consommation de combustibles fossiles.

- Deuxièmement, l'amélioration de la qualité de l'environnement n'est pas l'affaire d'un seul pays, mais nécessite des efforts collectifs entre tous les pays sur l’échelon mondial.

La partie suivante de cette étude sera consacrée à l'examen du potentiel des sources d'énergie renouvelables pour réduire les émissions de carbone. Nous essayerons également de donner une évaluation de la transition énergétique dans les pays européens et de leurs progrès en matière de réduction des émissions de carbone.

# Chapitre 3

# Le rôle des énergies renouvelables dans la neutralité carbone

# Cas des pays Européens

## 1. Introduction

Afin de limiter l'augmentation de la température mondiale à 2°C par rapport à l'ère préindustrielle, tous les secteurs de l'activité économique doivent atteindre l'objectif de zéro émission nette de carbone, au milieu du siècle (IRENA 2020).

Atteindre ce niveau nécessitera des changements économiques et techniques majeurs dans les industries de masse à forte intensité énergétique, en particulier dans le secteur des transports et celui de la production d'énergie.

L'accord de Paris de 2015 a mis l'accent sur la décarbonisation du secteur de l'énergie, qui est le principal responsable des émissions de carbone. En effet, la forte demande d'énergie au niveau mondial (Sarkodie et Owusu 2017) rend l'augmentation des émissions de carbone quasi- inévitable (Baek 2016 ; Sarkar et al. 2018 ; Sharif et al. 2019).

Il faut noter que cette augmentation des émissions de carbone constitue un problème environnemental et écologique majeur et persistant qui menace la biodiversité sur l'échelon du globe terrestre (Alola et al. 2019).

Bien que des mesures qui pourraient jouer un rôle partiel ou temporaire dans la réduction des émissions carbone ont été mises en œuvre, elles restent largement insuffisantes afin que le défi d'émissions nettes égales à zéro ou neutralité carbone devienne une réalité.

L’une des options pour réduire l’émission carbone consiste à assurer une transition énergétique des sources d’énergies conventionnelles vers des sources d'énergies renouvelables (Moutinho et al. 2015 ; Ari et Yikmaz 2019 ; IRENA 2020).

Cette transition constitue un défi majeur pour le secteur des industries les plus énergivores (l'acier, le ciment, la chimie et l'aluminium) et pour le secteur les transports (le fret routier, l'aviation et le transport maritime).

Bien que le monde ait pris conscience de la nécessité de réduire les émissions carbones de ces secteurs, les progrès enregistrés dans leur processus de décarbonisation restent très limités.

C’est la raison pour laquelle le pouvoir public, pour contribuer la décarbonation du secteur de l’énergie, ont concentré leurs efforts en faveur d’une incitation au développement des énergies renouvelables par différents mécanismes de soutien (feed-in-tariffs, feed-in-premium, enchères, certificats verts etc.).

L’installation de plus en plus importante de capacités en énergies renouvelables a permis de stabiliser relativement la croissance des émissions carbone dans le secteur de l'énergie.

Ceci d’autant plus que la baisse régulière du coût des énergies renouvelables, en particulier de l’éolien et du solaire photovoltaïque a contribué à des installations massives dans toutes les régions du monde (IRENA 2020).

Au niveau mondial, la capacité de production d'énergie renouvelable a été multipliée par près de 4 (de 754 GW à 2799 GW) entre 2000 et 2020. Cette chute s'explique par l'amélioration des technologies, la production à grande échelle, la concurrence sur le marché de l'énergie et l'expérience des fournisseurs. Entre 2010 et 2020, le coût de la

production d'électricité à partir de l'énergie solaire photovoltaïque a diminué de près de 85 %. D'autres faits marquants concernant le coût de production des énergies renouvelables sont présentés ci-dessous. La figure de l'annexe 3.A montré la réduction du coût nivelé de l'électricité pour la production d'énergie éolienne et solaire, que ce soit sur terre ou en mer.

- Par rapport à 2019 en 2020, malgré la pandémie actuelle de COVID-19, le coût lissé de l'électricité (LCOE) produit par les nouvelles centrales éoliennes terrestres et les centrales éoliennes en mer a baissé de 13 % et 9 %, respectivement. Le LCOE de l'énergie solaire photovoltaïque en mer et de l'énergie solaire à concentration a baissé de 7 % et 16 % respectivement au cours de la même période.
- Au cours de la dernière décennie, le coût de l'électricité d'origine éolienne et solaire a diminué pour atteindre le niveau le plus bas jamais enregistré. Au niveau mondial, depuis 2010, un total de 644 GW de capacité de production d'électricité a été ajouté au coût le plus bas, même moins cher que toute autre option de combustible fossile la moins chère disponible. Une nouvelle baisse de près de 32 milliards de dollars du coût de production de l'électricité est attendue en raison de la production moins chère de 534 GW dans les économies émergentes.
- Les nouveaux projets d'énergie éolienne et solaire remplacent de plus en plus les centrales au charbon les moins durables et les moins chères. Une analyse réalisée par l'IRENA montre que près de 800 GW de capacité de production d'électricité à partir du charbon ont un coût supérieur à celui des nouvelles centrales éoliennes terrestres et solaires. Si ces centrales au charbon étaient remplacées par les nouvelles technologies renouvelables, le coût annuel pourrait baisser

jusqu'à 32 milliards de dollars et la réduction annuelle de $CO_2$ devrait être d'environ 3 gigatonnes.

Au cours des deux dernières décennies, les énergies renouvelables sont devenues progressivement la source dominante de la production d'électricité dans le monde. En 2020, un niveau record d'électricité a été produit à partir de sources renouvelables, ce qui représente plus de quatre fois l'électricité produite à partir de toute autre source (c'est-à-dire fossile) la même année.

Des progrès technologiques ont été enregistrés à la fois dans les domaines du stockage dès l'énergies par les batteries, de la mobilité électrique et des technologies numériques. En outre, l'installation de mini et super-réseaux intelligents améliore la capacité du secteur de l'électricité à trouver des solutions à l'intermittence des énergies renouvelables (éolien, solaire). D'autre part, l'hydrogène vert et la bioénergie deviennent des solutions pour fournir de l'énergie pour la mobilité électrique et pour les bâtiments résidentiels et commerciaux. Ce qui constitue une trajectoire prometteuse vers la décarbonisation du secteur énergétique mondial (IRENA 2021).

Il faut noter qu'en plus d'assurer la production d'électricité, les énergies renouvelables créent également des opportunités d'emploi sur le marché du travail. En 2019, parmi les 58 millions d'emplois dans le monde dans le secteur de l'énergie, environ 11 millions (20%) d'emplois étaient dans le secteur renouvelable. En outre, ce secteur devrait fournir 122 millions d'emplois d'ici la fin de la première moitié de ce siècle.

De nombreux pays développés se sont fixés comme objectif d'atteindre des émissions nettes de carbone nulles d'ici à 2050. À la suite de l'accord de Paris sur le climat de 2015, les pays signataires ont l'obligation de présenter leurs « contributions déterminées au niveau national nationales » (CDNs).

Périodiquement et tous les cinq ans, un bilan mondial sera établi afin de rendre compte des progrès accomplis dans la réalisation de l'objectif de l'accord relative aux émissions et de faire des recommandations relatives aux efforts ultérieurs à mettre en œuvre par chaque pays signataire de l'accord afin de réduire les émissions carbones.

Il faut signaler que l'Agence internationale de l'énergie (IEA) prévoit un scénario selon lequel la part des énergies renouvelables atteindra deux tiers de l'approvisionnement énergétique total d'ici la fin de la première moitié du siècle.

La Commission européenne s'est assignée comme objectif d'adapter les politiques de l'UE en matière de climat, d'énergie, de transport et de fiscalité en vue de réduire les émissions nettes de gaz à effet de serre d'au moins 55 % d'ici à 2030 par rapport à leur niveau de 1990.

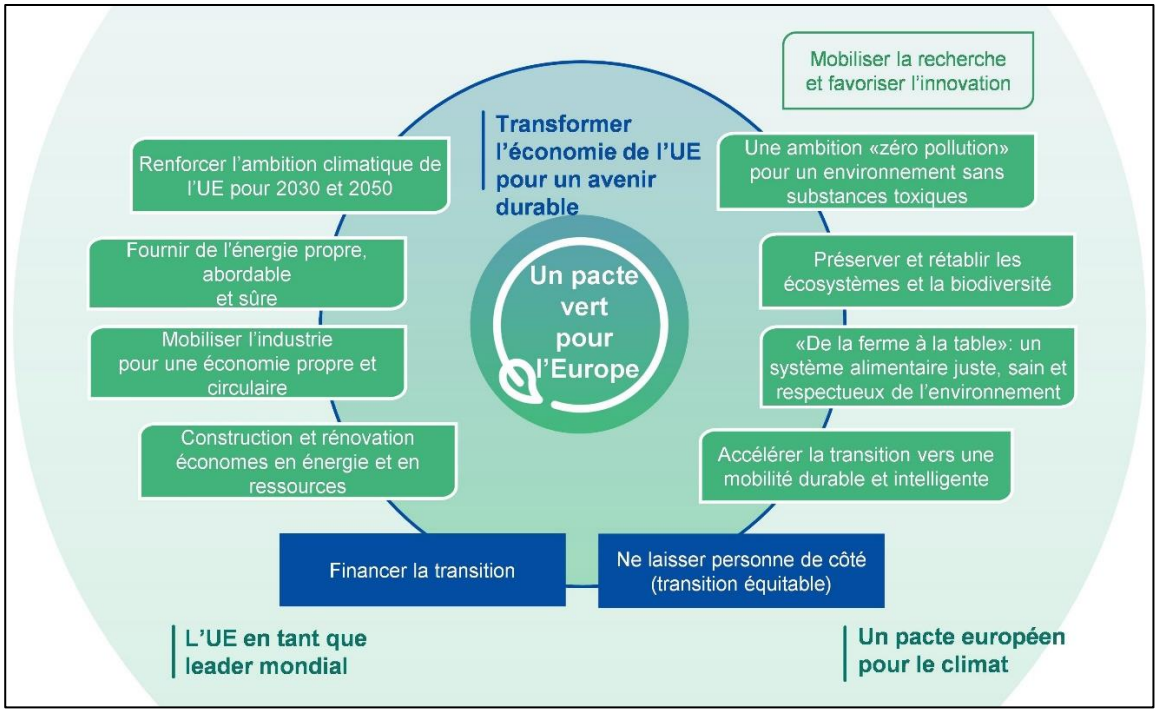
Le 12 décembre 2019, il y eu un accord au Conseil européen sur le Pacte vert européen (Green deal) et son objectif de neutralité carbone d'ici 2050 qui consiste à transformer l'UE en une économie moderne, efficace dans l'utilisation des ressources et compétitive, garantissant la fin des émissions nettes de gaz à effet de serre d'ici à 2050. Un bref résumé de l'accord vert est illustré dans la figure 3.1 ci-dessous.

Le pacte vert européen s'est assigné comme objectif l'augmentation de la part des énergies renouvelables jusqu'à 40% et d'améliorer l'efficacité énergétique jusqu'à 36-39%.

Malgré l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique mondial, la question qui se pose depuis longtemps est de savoir si les mécanismes adoptés par les décideurs politiques et la communauté scientifique sont efficaces ou non pour réduire réaliser l'objectif d'une réduction des émissions carbone. Une question particulièrement importante est de savoir si, sans nuire au rythme de la croissance

économique, la transition vers des technologies de production d'énergie propres et vertes permettra ou non de résoudre le problème de la réduction des émissions carbone. Autrement dit, les sources renouvelables qui sont des énergies vertes peuvent-elles assurer la dissociation entre la croissance économique et les émissions de carbone.

**Figure 3.1 : Présentation du Pacte vert européen**




Source : Commission Européenne

L'Agence internationale de l'énergie affirme que les efforts de promotion du développement durable et de la transition énergétique sur un échelon mondial ont pu contribuer à réduire les émissions carbones. Toutefois, il est très difficile d'affirmer que la réduction des émissions de carbone est uniquement le résultat du déploiement des énergies renouvelables puisque cette réduction peut être également due à d'autres facteurs. À cet égard, il est indispensable d'étudier séparément l'impact du déploiement des énergies renouvelables et la réduction de la part des énergies fossiles sur les émissions carbones.

L'objectif de cette étude est d'examiner empiriquement la contribution des sources d'énergie renouvelables dans la réduction des émissions de carbone dans les États membres de l'union Européenne (UE).

Cette étude s'inscrit dans la continuité de celle de Saqib et Benhmad (2021b) qui ont étudié la courbe de Kuznets environnementale pour les pays de l'union européenne. Leurs résultats ont mis en évidence la présence d'une courbe de Kuznets environnementale (EKC) et le fait que la consommation intensive d'énergie conduit à la dégradation de la qualité environnementale. Ils ont suggéré que l'adoption de technologies d'énergie renouvelable soit en mesure de contribuer à la réduction des émissions carbone.

C'est pourquoi, dans cette étude, nous avons fait la distinction entre les énergies renouvelables et les énergies fossiles afin d'examiner leurs impacts individuellement sur les émissions de carbone au sein de l'UE.

L'étude est organisée de la manière suivante. La section 2 présente la dynamique de la transition énergétique au sein des pays l'UE sur les trois dernières décennies. La section 3 illustre le modèle économétrique et la sélection des variables incluses sur la base de l'identité IPAT. La section 4 de l'étude fournit des informations détaillées sur les données relatives aux variables incluses dans notre modèle. La section 5 présente la méthodologie utilisée, les résultats empiriques ainsi que leur interprétation. La section 6 consiste en une discussion des résultats de l'analyse empirique ainsi que de leurs implications politiques tandis que la section 7 conclut.

## 2. Transition énergétique en Europe

Le pacte vert européen proposé par la commission européenne et adopté par le conseil de l'Europe en décembre 2019 consiste en une feuille de route de la nouvelle stratégie

de croissance de l'UE dont l'objectif est de transformer les États membres de l'union européenne en économies prospères, modernes et économes en consommation de ressources énergétiques.

L'objectif ultime de ce pacte vert est de faire de l'Europe le premier continent neutre sur le plan climatique à l'horizon 2050. L'accord vise à atteindre un niveau de croissance qui soit moins dépendant des ressources et sans émissions nettes de carbone en 2050.

Cet accord définit trois objectifs principaux : la réduction des émissions, l'augmentation de la part des énergies renouvelables et l'amélioration de l'efficacité énergétique. L'accord estime qu'une forte coordination entre les États membres et des efforts collectifs peuvent permettre d'atteindre les objectifs qui ont été fixés.

Ce pacte s'inscrit dans la continuité de l'accord de Paris de 2015 sur le changement climatique qui s'est fixé comme objectif de limiter l'augmentation de la température mondiale au-dessous de 2°C par rapport au niveau de l'ère préindustrielle. La limitation des émissions de gaz à effet de serre constitue le principal instrument qui permet la réalisation de cet objectif.

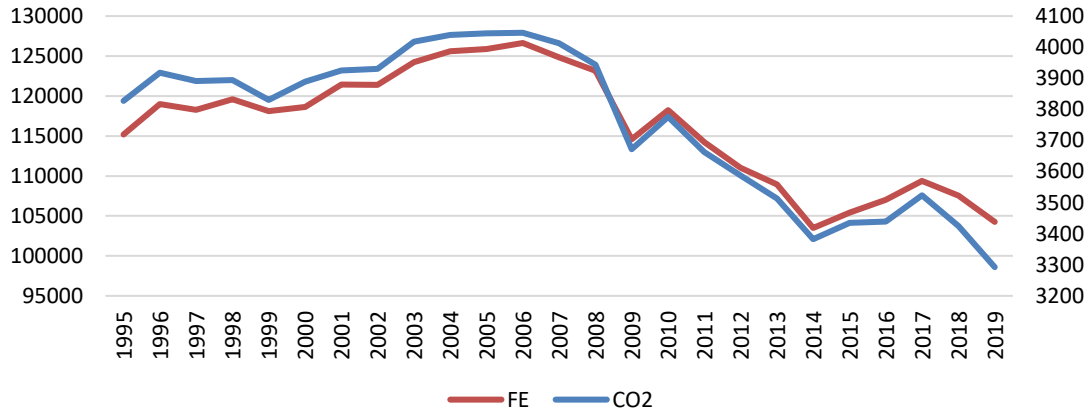
Mais, comme le secteur de l'énergie est le plus grand contributeur (trois quarts) aux émissions mondiales de carbone (Climact 2020), une transition énergétique assurant la conversion du secteur de l'énergie de l'utilisation d'énergies fossiles vers l'usage d'énergies neutres en carbone. Cette transition implique une transformation profonde à la fois au niveau de la production et de la consommation finale d'énergie.

Rappelons qu'à l'horizon 2020, les États membres avaient déjà élaboré des stratégies et des propositions législatives de lutte contre le réchauffement climatique, ce qu'on appelle les « objectifs 20-20-20 ». Ces objectifs ont été fixés en 2007 par les dirigeants de l'Union Européenne pour l'année 2020 : réduction de 20 % des émissions de gaz à

effet de serre, augmentation de 20 % de la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale et réduction de 20 % de la consommation énergétique primaire totale de l'Union, le tout par rapport aux niveaux de 1990.

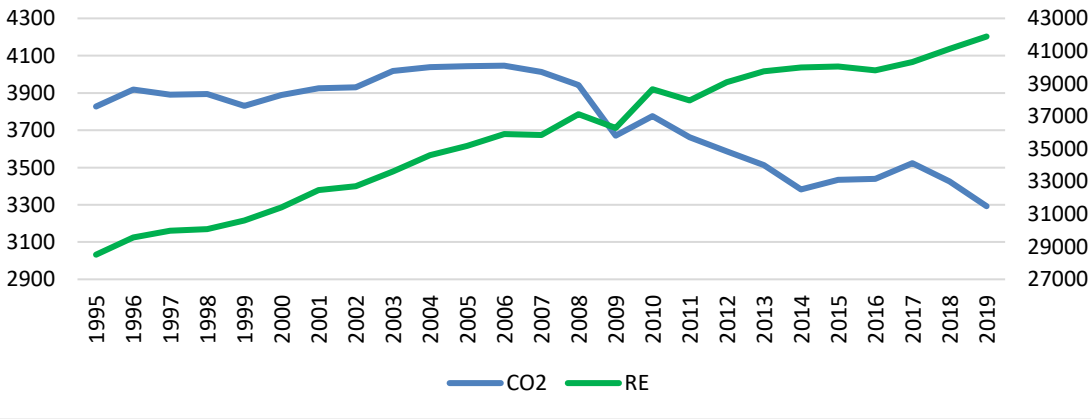
La figure 3.2 et la figure 3.3 suivante illustre l'évolution de la consommation des énergies fossiles (FE) et de la consommation des énergies renouvelables (RE), contre des émissions de carbone ($CO_2$) mesurées en millions de tonnes d'équivalent pétrole, au cours des trois dernières décennies au seins de l'union européenne.

**Figure 3.2: Énergie fossile et émissions de $CO_2$ dans l'UE**




*Source : Simulation des auteurs*

**Figure 3.3: Énergies renouvelables et émissions de $CO_2$ dans l'UE**




*Source : Simulation des auteurs*

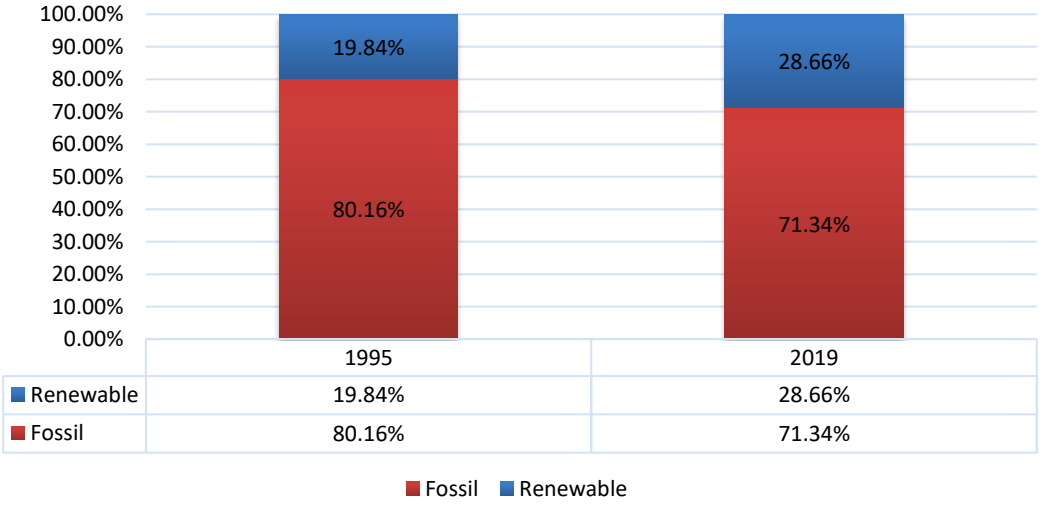
On constate que la consommation totale d'énergie et les émissions de carbone augmentaient continuellement jusqu'en 2006.

La consommation d'énergie fossile a augmenté jusqu'à la fin du vingtième siècle, mais a ensuite commencé à diminuer progressivement et de manière continue. A l'opposé, la consommation d'énergies renouvelables a enregistré un taux de croissance positif, et elle représente même actuellement plus de 20% de la consommation totale d'énergie au sein l'UE.

Parmi les raisons possibles de changement de tendance des émissions carbone, on peut citer la récession économique à la suite de la crise financière et économique consécutive à la crise des subprimes aux USA, et l'introduction du système européen d'échange de quotas d'émission (EU-ETS) en 2005 dont l'objectif est d'inciter les différents secteurs industriels à réduire leurs émissions carbone (Khan et al. 2019).

La figure 3.4 suivante met en évidence deux dynamiques contradictoires dans les croissances respectives des énergies fossiles et des énergies renouvelables entre 1995 et 2019.

**Figure 3.4: Transition énergétique en Europe**



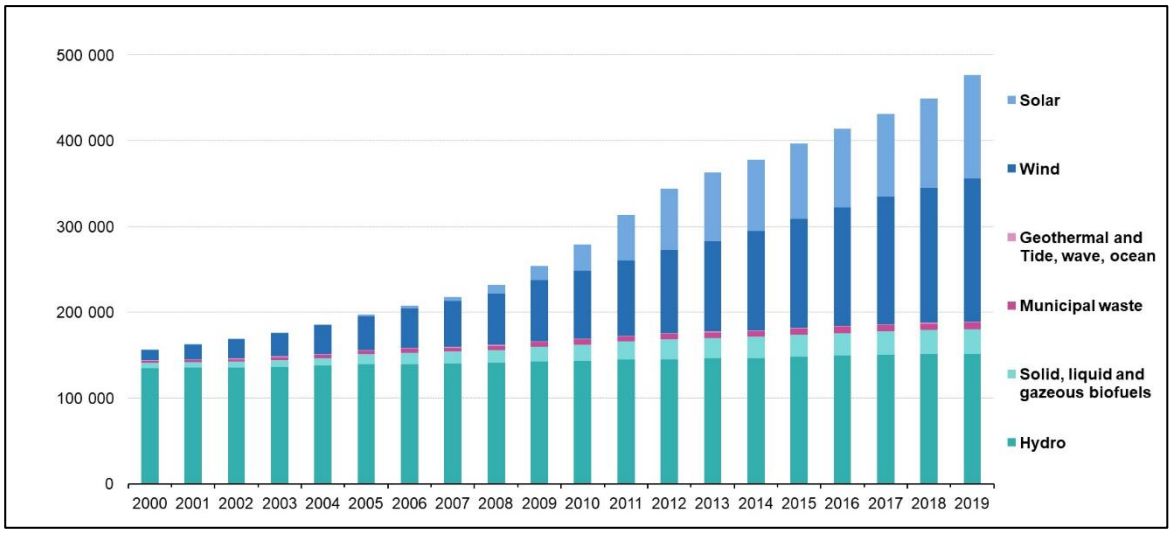

*Source : Simulation des auteurs*

L'UE a été à l'avant-garde du déploiement des énergies renouvelables au cours des deux dernières décennies. Les politiques de soutien au déploiement des sources d'énergie

renouvelables ont permis de supprimer des obstacles importants en particulier le coût de l'installation.

Selon Jacques Percebois (2014), Le mécanisme de soutien FIT (Feed-in-tariffs) a été mis en place au début des années 2000 dans la plupart des pays de l'Union européenne pour favoriser le développement des énergies renouvelables. L'électricité d'origine renouvelable, notamment éolienne et solaire, bénéficie d'un prix d'achat garanti, fixé par les pouvoirs publics dans le cadre d'un contrat de long terme (entre quinze et vingt ans). Ce prix d'achat garanti est très rémunérateur puisqu'il est généralement supérieur au prix du marché spot de l'électricité. Le surcoût est réparti entre tous les consommateurs d'électricité par une sorte de taxe appelée C.S.P.E. (Contribution au service public de l'électricité).

**Figure 3.5 : Capacité électrique nette pour les énergies renouvelables et les déchets renouvelables dans l'UE-27**



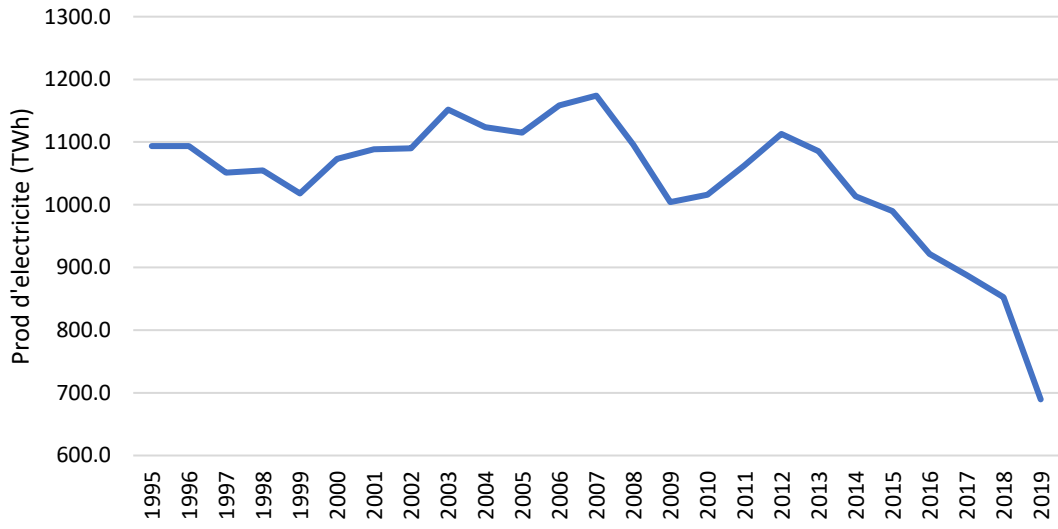

*Source : Eurostat*

Le producteur d'électricité éolienne ou photovoltaïque n'a pas à se soucier de la vente de sa production et il n'est pas sensible au prix du marché puisque sa rémunération est fixée hors marché.

Par conséquent, ce mécanisme de soutien a permis l'installation de larges capacités d'énergies renouvelables en Europe comme le montre la figure 3.5.

De même, l'UE vise à éliminer complètement l'utilisation du charbon dans le secteur de l'électricité à l'horizon 2040. Quatre États membres (l'Autriche, la Belgique, le Portugal et la Suède) ont déjà complètement abandonné le charbon et quatorze autres se sont engagés à le faire le plus tôt possible. Mais certains États membres, comme la Pologne, la République tchèque et la Slovénie, n'ont toujours pas adopté de politiques claires susceptibles de réaliser les objectifs de l'UE de sortie du charbon. La figure suivante montre l'évolution de production d'électricité basées sur le charbon en Europe.

**Figure 3.6: Evolution de Production d'électricité du charbon**




*Source : Simulation des auteurs* (*source de données British Petroleum*)

Les États membres de l'UE se sont engagés à poursuivre leurs actions en vue d'atteindre les objectifs de 2030, 2040 et 2050 malgré les difficultés conjoncturelles. En effet, le ralentissement économique causé par la pandémie du COVID19 risquerait d'imposer des contraintes financières aux Etats membres de l'UE qui pourraient entraver le financement du déploiement des énergies et donc la mise en œuvre du pacte vert.

Jusqu'à présent, les émissions annuelles de carbone au sein de l'UE diminuaient de façon continue, bien que les objectifs mondiaux annuels ne soient pas totalement atteints.

Il est donc impératif de soulever les doutes possibles relatifs au rôle potentiel des énergies renouvelables dans la réduction des émissions de carbone, et donc dans la réalisation des objectifs de l'accord de Paris, et du pacte vert européen.

La présente étude s'assigne comme objectif de répondre à cette question en faisant appel au modèle STIRPAT (Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology) élaboré par Dietz et Rosa (1997).

## 3. Le Modèle

Depuis les années 1970, de nombreux chercheurs ont tenté de trouver le moteur de la pollution environnementale (Ehrlich et Holder (1971, 1974)). L'identité $I = PAT$ est apparue comme l'un des cadres les plus populaires et les plus utilisés pour expliquer les principales raisons de la dégradation de l'environnement (Raskin 1995 ; York et al. 2002), et surtout pour modéliser l'impact des activités humaines sur l'écologie (Stern et al. 1992 ; Harrison et Pearce 2000).

Selon cette identité, les impacts environnementaux globaux (I) sont le produit multiplicatif de trois forces fondamentales : la population (P), la richesse (A) et la technologie (T). Cette identité mathématique peut être utilisée comme équation comptable. La production intérieure brut par habitant (PIB/tête) est utilisée comme indicateur de la richesse (A) et la technologie (T) est l'impact par unité d'activité économique.

Le principal atout de cette identité est qu'elle identifie la relation exacte entre les variables des deux côtés de l'équation et formule une spécification parcimonieuse des

variables motrices responsables de la dégradation de l'environnement. Les spécifications multiplicatives de ces variables clés montrent qu'aucune variable n'est responsable à elle seule d'un quelconque dommage environnemental (York et al. 2003).

Waggoner et Ausubel (2002) ont développé une version avancée (*ImPACT*) de cette identité qui désagrège la technologie en deux parties : par unité de consommation du PIB (C) et par unité d'impact de la consommation (T), l'identité devient $I = PACT$.

La popularité de ces deux identités tient à leurs principes écologiques clairs, à leur spécification parcimonieuse et précise, et à leur capacité d'expliquer avec précision les forces motrices des dommages environnementaux.

Cependant, ces deux identités pourraient souffrir de certaines limites. En effet, en tant qu'équations comptables, ces identités ne permettent aucun test d'hypothèse permettant d'étudier l'effet isolé de chaque variable seule et ne permettent donc pas d'appréhender les effets non proportionnels et non monotones des variables explicatives.

Afin de surmonter les limites et faiblesses de ces deux versions, une nouvelle a été introduite par Dietz et Rosa (1994, 1997). Il s'agit d'une version stochastique de l'IPAT, nommée Stochastic Impacts by Regression on Population Affluence and Technology (STIRPAT) qui permet la vérification empirique des hypothèses du modèle qui en découle.

La spécification du modèle STIRPAT est donnée ci-dessous.

$$I_{it} = \alpha.P_{it}^{b}.A_{it}^{c}.T_{it}^{d}.e_{it} \qquad (3.1)$$

Dans l'équation ci-dessus, « a » est la constante, « b », « c », et « d », sont les termes exponentiels de toutes les variables présentes sur le côté droit.

En faisant appel à une transformation par le logarithme naturel, le modèle ci-dessus peut s'exprimer comme suite ;

$$lnI_{it} = ln\alpha + b\ ln\ (P_{it}) + c\ ln\ (A_{it}) + d\ ln\ (T_{it}) + ln\ e_{it} \quad (3.2)$$

La spécification STIRPAT a été largement utilisée dans la littérature de l'économie de l'énergie pour étudier les déterminants de la pollution environnementale.

Dans l'équation 3.2, l'impact sur la qualité de l'environnement a été approximé par les émissions de carbone, tandis que le produit intérieur brut a été substitué à la richesse (*A*) et la consommation d'énergie a été substituée à la technologie (*T*).

La consommation d'énergie peut être subdivisée en deux grands types : la consommation d'énergies fossiles et la consommation d'énergies renouvelables. L'énergie fossile qui provient du charbon, du pétrole et du gaz naturel est responsable des émissions de carbone. A l'opposé, l'énergie renouvelable qui provient de l'hydroélectricité, du vent, du soleil et de la biomasse n'émet pas ou très peu de carbone par rapport à l'énergie fossile. Il est donc important d'examiner individuellement l'impact des consommations de chaque source d'énergies (fossiles et renouvelables) sur les émissions carbones. Ainsi, pour approximer la technologie dans l'équation (2.2), nous pouvons distinguer la consommation d'énergie provenant de l'énergie fossile (FE) et la consommation d'énergie provenant des sources d'énergie renouvelables (RE).

La forme finale du modèle peut donc être écrite comme suite :

$$\ln CO_{2\,it} = \ln\alpha + b_1 \ln (RE_{it}) + b_2 \ln (FE_{it}) + b_3 \ln (GDP_{it}) + b_4 \ln (P_{it}) + \ln e_{it} \quad (3.3)$$

Les coefficients de toutes les variables apparaissent sous forme de logarithme naturel, ils seront donc interprétés comme des élasticités (Saqib et Benhmad 2021a).

Le coefficient d'élasticité supérieur à l'unité montre que l'impact croît plus rapidement par rapport aux variables motrices et inférieur à l'unité signifie l'inverse (York et al. 2003).

Dans l'équation 3.3, « $b_1$ » représente le coefficient de la consommation d'énergie renouvelable et devrait être inférieur à zéro ($b_1 < 0$), « $b_2$ » est le coefficient de la consommation d'énergie fossile et devrait être supérieur à zéro ($b_2 > 0$). D'autre part, « $b_3$ » est le coefficient de la croissance économique et on s'attend à ce qu'il soit de signe positif ou négatif ($b_3 >, < 0$). En cas de signe positif, la croissance économique conduira à la détérioration de la qualité de l'environnement alors que le contraire est vrai pour le signe négatif. Enfin, « $b_4$ » est le coefficient de la population et devrait avoir un signe positif ($b_4 > 0$).

## 4. Données

Les données pour les 25 pays européens (Allemagne, Autriche, Belgique, Bulgarie, Chypre, Croatie, Danemark, Espagne, Estonie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Italie, Lettonie, Lituanie, Luxembourg, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République tchèque, Slovaquie, Slovénie et Suède) de 1995 à 2019 ont été collectées dans la base de données d'Eurostat.

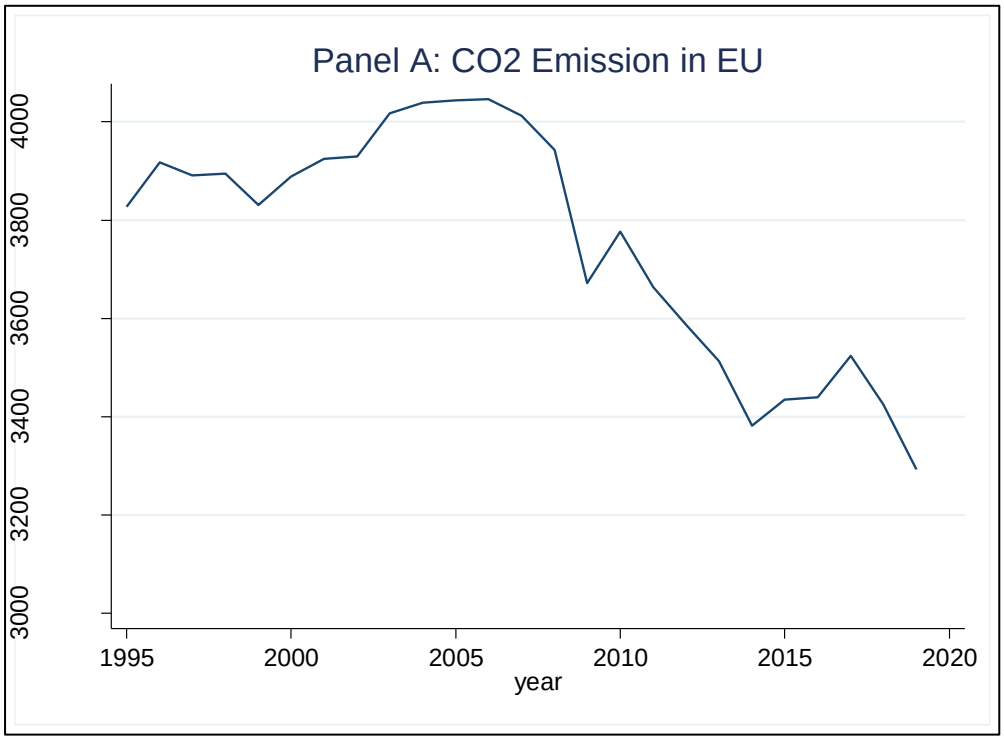
Les années 1990 sont considérées comme une décennie importante au cours de laquelle le monde s'est pratiquement rendu compte de l'impact considérable du changement climatique et a commencé à lutter contre ce phénomène. Le nombre d'années a été choisi en fonction de la disponibilité des données afin de construire un échantillon de données nous permettant d'estimer un panel cylindré.

- Les émissions de $CO_2$ provenant de la consommation totale d'énergie sont exprimées en millions de tonnes métriques d'équivalent pétrole (MMTOE).

- La consommation d’énergie renouvelable (RE), d’énergie fossile (FE), et d’énergie totale (TE) a été mesurée en millions de tonnes d'équivalent pétrole (MTOE).
- L'énergie renouvelable est constituée de l'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, la biomasse et le biodiesel, alors que l'énergie fossile est celle produite à partir de pétrole, de gaz et de charbon.
- Le PIB a été mesuré comme la production totale d'un pays en milliards de dollars pour une année alors que la population a été mesurée en millions d'individus vivant dans un pays.

La figure 3.7 suivante fournit des informations détaillées sur l’évolution de la tendance pour toutes les variables incluses dans l'équation 3.3.

**Figure 3.7 : Graphique de séries temporelles de variables**

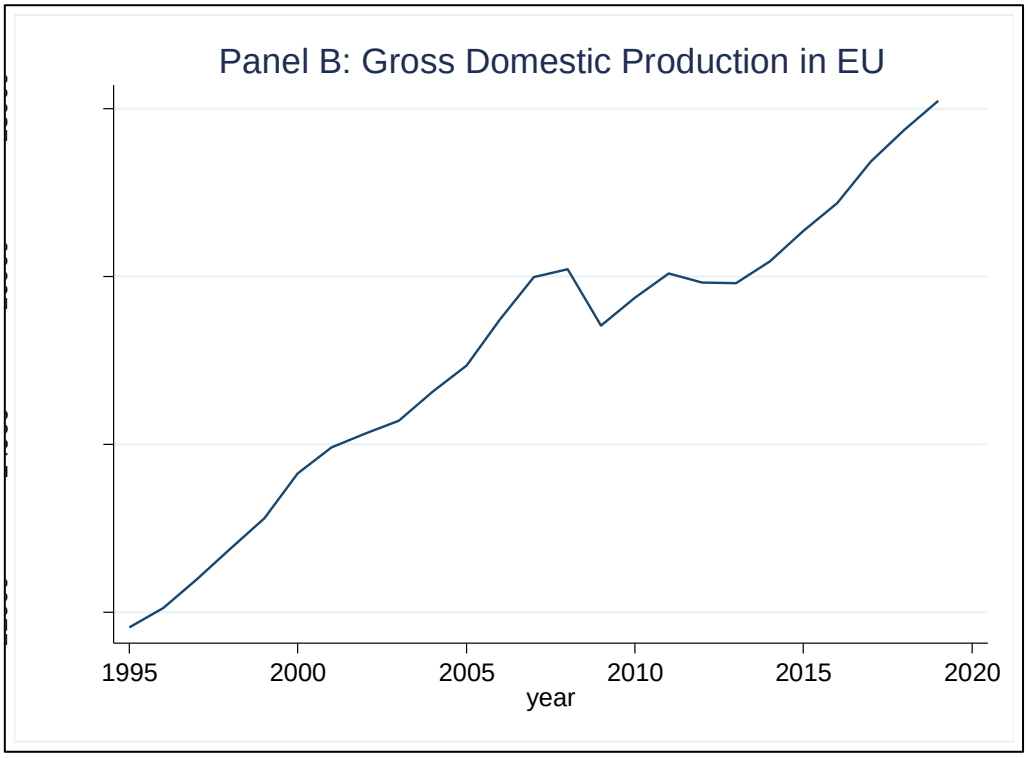



On peut observer dans le panneau A de la figure que les émissions de carbone au sein de l’union européenne.

Ces émissions ont atteint un maximum en 2005, et ont ensuite commencé à diminuer rapidement malgré quelques faibles rebonds. Nous sommes donc sur une tendance baissière depuis 2005.

Le panneau B de la figure illustre la tendance du produit intérieur brut de la région.

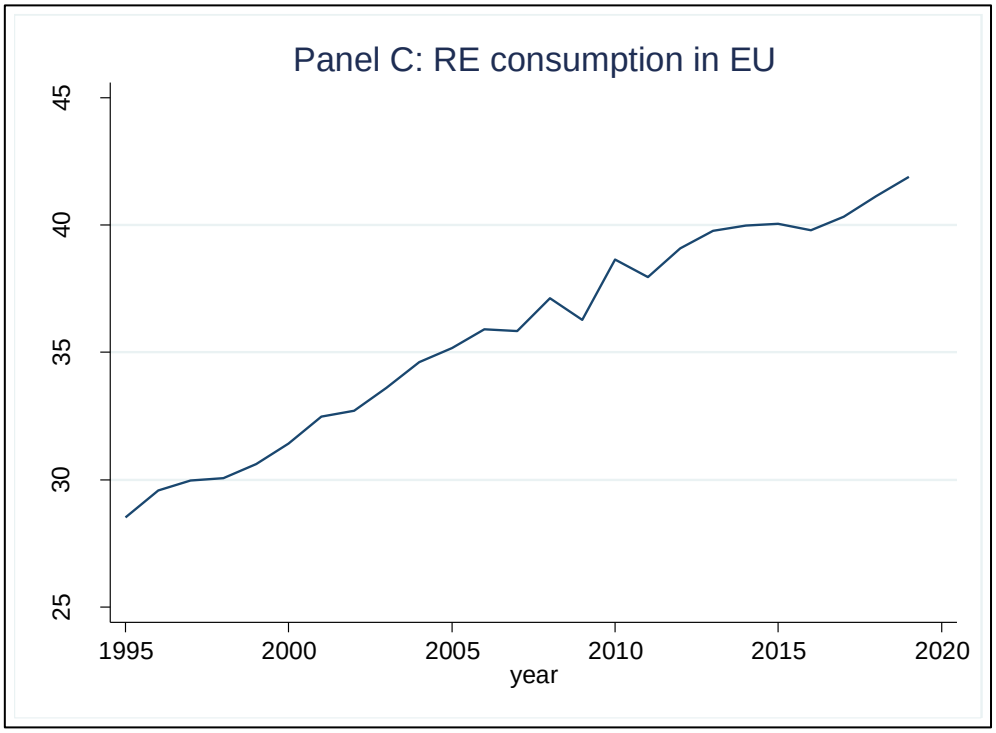
On peut voir que les activités économiques augmentent continuellement avec le temps. L'augmentation des activités économiques accroît la demande d'énergie et provoque donc de plus en plus d'émissions de carbone. Pour répondre à cette demande, on observe une tendance à la hausse de la consommation globale d'énergie.

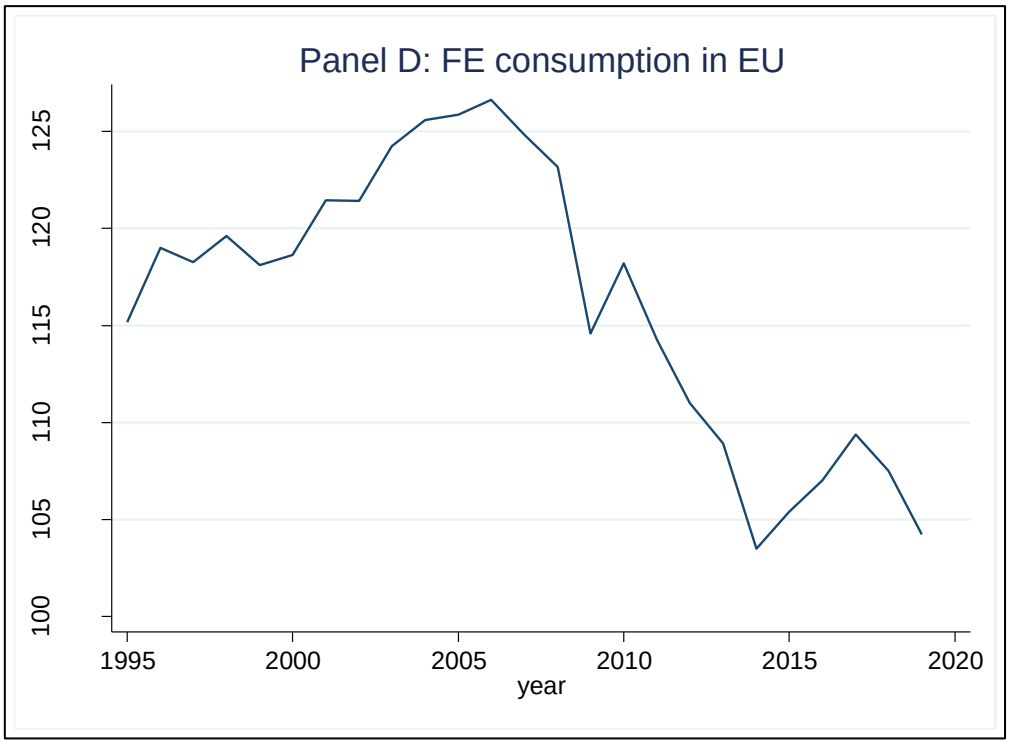



Le graphique de la série chronologique de la consommation d'énergie renouvelable est illustré dans le panneau C.

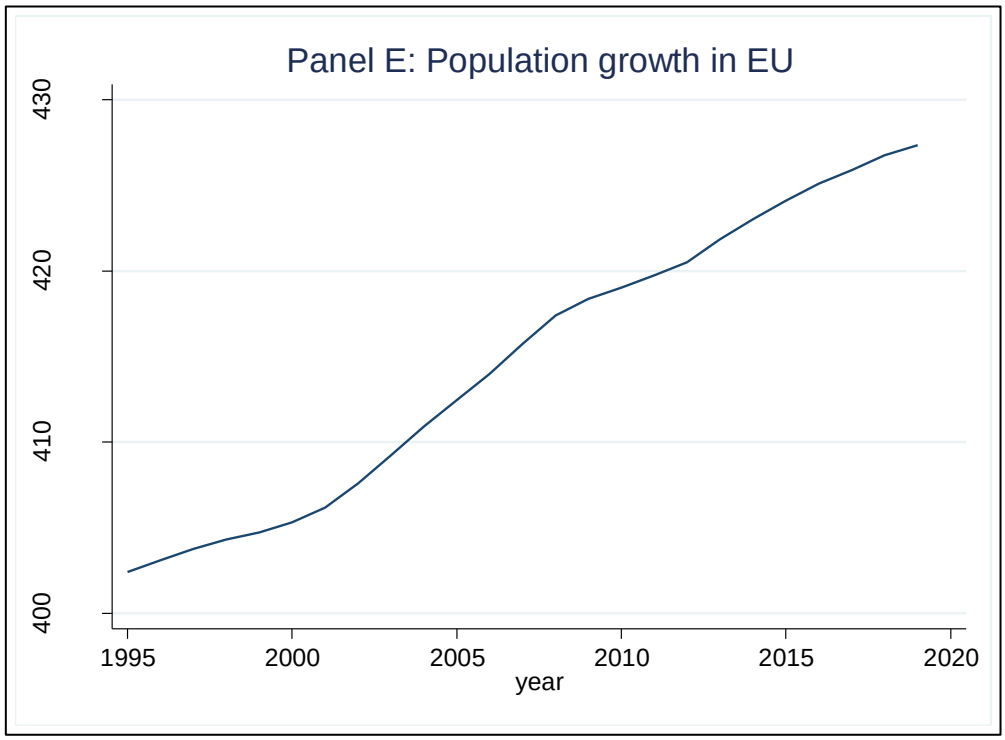
Nous pouvons voir que la consommation d'énergie renouvelable augmente avec un taux croissant au fil du temps.

Alors que l'énergie fossile (illustré dans le panneau D) est toujours la source d'énergie dominante, une tendance continue à la hausse de sa consommation a été enregistrée en 2006. Cependant, au cours de la dernière décennie, sa demande a considérablement diminué et devrait continuer à baisser dans les années à venir.



Enfin, le panneau E illustre une augmentation régulière de la population au fil du temps.




La population totale de la région a augmenté mais est restée stable. Aucune variation inégale n'est observée au cours de la période étudiée, ce qui montre que la croissance démographique est maîtrisée dans l'Union européenne.

**Tableau 3.1: Statistiques descriptives**

| Variables | Acronyms | Obs. | Mean | Std. Dev. | Minimum | Maximum |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Carbon emission** | $CO_2$ | 624 | 15.262 | 213.164 | 4.9 | 1035 |
| **RE consumption** | RE | 624 | 1428.1 | 2591.65 | 4.4501 | 13286.2 |
| **FE consumption** | FE | 624 | 4649.6 | 6023.03 | 199.68 | 30761.3 |
| **GDP** | GDP | 624 | 603.605 | 887.303 | 17.2 | 4182.1 |
| **Population** | POP | 624 | 16.6105 | 21.823 | .40862 | 83.0929 |

Les statistiques descriptives de notre ensemble de données pour toutes les variables clés sont présentées dans le tableau 3.1. La valeur moyenne des émissions de carbone est égale à 15,262 et les valeurs minimale et maximale sont respectivement de 4,9 et 1035. D'autre part, la consommation moyenne de combustibles fossiles est supérieure à la

consommation moyenne d'énergies renouvelables en Europe. Parmi toutes les variables, l'énergie renouvelable présente la plus grande variabilité (avec une valeur minimale de 4,45 et une valeur maximale de 13286), ce qui reflète la transition énergétique dans l'ensemble de la région.

# 5. Méthodologie

## 5.1. Le test de racine unitaire

Les tests de racine unitaire qui s'effectuent dans le cadre d'un panel non stationnaire permettent d'ajouter de la dimension individuelle à la dimension temporelle, et donc d'augmenter le nombre d'observations. Ce qui leur confère une puissance largement supérieure aux tests de racine unitaire en séries temporelles.

Cette puissance des tests de racine unitaire en panel réside dans leur distribution asymptotique. En effet, à l'opposé des tests de racine unitaire en séries temporelles dont les statistiques font appel à des lois particulières, les tests de racine unitaire en panel utilisent la loi normale comme loi asymptotique.

D'autre part, les tests de racine unitaire permettent la prise en compte de l'hétérogénéité entre les individus composant le panel, qui concerne à la fois les paramètres du modèle que la racine autorégressive.

Rappelons que deux générations de tests de racine unitaire ont vu le jour : les tests de première génération qui sont basés sur l'hypothèse de l'indépendance inter-individuelle et les tests de deuxième génération qui supposent une dépendance individuelle ou transversale (Maddala et Wu 1999 ; Hadri 2000).

La dépendance transversale (CD) entre les individus du panel constitue un véritable défi empirique sérieux et doit être testée avant d'effectuer les tests de racine unitaire du panel (Sharif et al. 2019).

L'hypothèse d'interdépendance individuelle est vérifiée par le test de Pesaran (2004) de dépendance individuelle ou transversale. Ce test donne des résultats robustes à la fois lorsque les sections transversales sont plus petites ou plus grandes que la période temporelle.

Le test de Pesaran (2004) peut être écrit sous forme fonctionnelle comme suite :

$$CD = \sqrt{\frac{2T}{N(N-1)}}\left(\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N}\hat{\rho}ij\right) \quad (3.4)$$

L'hypothèse nulle du test indique l'absence de dépendance transversale entre les individus du panel. Une probabilité dont la valeur est inférieure à 5% montre le rejet de l'hypothèse nulle et peut être traduite par la présence d'une dépendance transversale.

Nous faisons appel au test d'indépendance individuelle de Pesaran (2004) dans le cadre de notre analyse puisque l'Union européenne, étant très intégrée économiquement, permet de larges débordements entre les pays de l'UE de chocs (Saqib et Benhmad, 2021b). Cela qui pourrait conduire à une corrélation entre les individus du panel (Isik et al. 2019).

Signalons que notre échantillon de données est composé de 26 pays de l'UE ou sections transversales et d'une période temporelle de 24 ans (T < N).

Les résultats du test racine unitaire Pesaran (20004) sur les variables de notre modèle présenté précédemment sont présentés dans le tableau 3.2 suivant.

**Tableau 3.2 : Test de dépendance transversale de Pesaran (2004)**

| Variables | $LCO_2$ | LRE | LFE | LGDP | LP |
|---|---|---|---|---|---|
| CD test | 35.436 | 55.395 | 37.347 | 77.267 | 7.466 |
| P-value | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Mean I | 0.41 | 0.64 | 0.43 | 0.89 | 0.09 |
| Mean abs I | 0.47 | 0.73 | 0.48 | 0.89 | 0.79 |

Les probabilités pour les coefficients de toutes les variables de notre modèle ont des valeurs inférieures à 5%. Ces résultats du test de Pesaran (2004) plaident en faveur de la présence d'une forte dépendance entre les individus de notre panel.

Par conséquent, afin d'analyser la non-stationnarité des variables du modèle, nous devons faire appel à des tests de racine unitaire qui sont robustes à la dépendance transversale, qu'on appelle Les tests de racine unitaire de panel de deuxième génération.

L'un des tests de racine unitaire de deuxième génération les plus utilisés dans la littérature empirique est le test CIPS (cross-sectionally augmented IPS) introduit par Pesaran (2007).

Suivant Pesaran (2007), le test CIPS peut être écrit sous la forme fonctionnelle suivante.

$$\Delta y_{it} = \eta_i + \beta_i y_{it-1} + \psi_i T + \sum_{j=1}^{n} \theta_{ij} \Delta y_{it-j} + e_{it} \qquad (3.5)$$

Dans l'équation ci-dessus, delta est l'opérateur de différence « $\Delta y_{it} = y_{it} - y_{it-1}$ », « $e_{it}$ » est le terme d'erreur, « $T$ » est la tendance temporelle et « $\eta_i$ » est l'interception. L'hypothèse nulle du test indique que toutes les variables sont non stationnaires (ayant une racine unitaire) contre l'hypothèse alternative qu'au moins une variable est stationnaire (n'ayant pas de racine unitaire).

$H_o: \beta_i = 0$

$H_a: \beta_i < 0 \quad i = 1, 2 \ldots\ldots n$

Une valeur de probabilité supérieure à 5% (non-significatives) sera considérée comme l'acceptation de l'hypothèse nulle, et nous pourrons conclure que la variable est non stationnaire. Alors que nous rejetterons l'hypothèse nulle pour toutes les valeurs de probabilité inférieure à 5% (significatives), ce qui signifie que les variables sont stationnaires.

Les résultats du test de racine unitaire IPS augmenté en coupe transversale sont illustrés dans le tableau 3.3.

**Tableau 3.3 : Le test de racine unitaire**

| Variables | CIPS test | |
|---|---|---|
| | **Level** | **1st difference** |
| $LCO_2$ | -2.431** | _ |
| LRE | -2.309 | -4.999*** |
| LFE | -2.704** | _ |
| LGDP | -2.083 | -3.279*** |
| LPOP | -1.775 | -2.703** |
| *, **, *** montre que la signification à 10%, 5%, 1% | | |

Selon les résultats du test de racine unitaire IPS augmenté en coupe transversale, on peut conclure les émissions carbones et la consommation d'énergies fossiles semblent stationnaires en niveau.

A l'opposé la consommation d'énergies renouvelables, le produit intérieur brut et la population présentent une racine unitaire et ne sont pas stationnaires en niveau. Ces variables peuvent être rendues stationnaires lorsqu'on leur applique un filtre de différence première.

### 5.2. Estimations de long terme

L’examen de la littérature montre que les études empiriques ont utilisé différentes méthodes économétriques pour estimer les paramètres de la relation de long terme pouvant exister entre les variables d’un modèle.

En effet, plusieurs études font appel au modèle ARDL (Lau et al. 2014 ; Alam et al. 2016 ; Ali et al. 2017 ; Sarkodie et Strezvo 2018 ; Bese et Kalayci 2019 ; Shareef et al. 2020 ; etc.), aux modèles MG/PMG/AMG (Ahmed et al. 2016 ; Baek 2016 ; Churchill et al. 2018 ; Bekun et al. 2019 ; Destek et Sarkodie 2019). D'autres études ont utilisé l'approche des variables instrumentales ou de l’estimateur GMM (Omri et al. 2015 ; Lie et al. 2016 ; Hove et Tursoy 2019) ou DOLS/FMOLS (Farhani et al. 2014 ; Begum et al. 2015 ; Liu et al. 2017 ; Anwar et al. 2021) ou 2SLS (Murshed 2020), etc.

L’utilisation de toutes ces méthodologies empiriques se base sur les caractéristiques des données, en particulier sur la stationnarité des variables du modèle estimé. Ainsi, ces méthodologies peuvent été divisées en deux groupes : les méthodologies de première génération et celles de deuxième génération. Les méthodes de deuxième génération qui ont l’avantage de prendre en compte la présence de dépendance transversale sont fortement recommandées pour l’analyse empirique de données dans le cadre de panel dynamique où le nombre de sections transversales est aussi important que le nombre d'observations temporelles.

En pratique, il existe deux options pour l’estimation de tels modèles. D'un côté, on peut estimer chaque panel séparément et étudier la moyenne des coefficients estimés entre les groupes. L'estimateur du groupe moyen (MG) est suggéré pour mener ce type d'analyse.

Cependant, cet estimateur ne tient pas compte du fait que certains coefficients peuvent être similaires entre les groupes. D'autre part, lorsqu'on fait appel à des estimateurs groupés conventionnels tels que les effets fixes et les effets aléatoires, les constantes ne sont pas contraintes d'être les mêmes alors que les autres coefficients sont contraints d'être identiques.

Par conséquent, dans le cadre de notre analyse empirique, nous devons à la fois, requiert la mise en commun et le calcul de la moyenne des coefficients. C'est pour cela que nous faisons appel à un estimateur intermédiaire de deuxième génération introduit par Pesaran et al. (1999) appelé le Pooled Mean Group (PMG).

Le PMG qui considère à la fois le Pooling et le moyennage des coefficients semble être la méthode appropriée pour notre analyse de panel dynamique en présence de dépendance transversale. Ceci d'autant plus, que les résultats de la section 4.1, montrent que nos variables sont intégrées d'ordre mixte (à la fois $I(0)$ et $I(1)$). Le choix de l'estimation PMG est donc parfaitement adapté à notre analyse.

### 5.2.1. Estimations moyennes groupées des groupes (PMG)

La méthodologie PMG a été introduite par Pesaran et al. (1999) et est un type de modèle ARDL (Autoregressive Distributive Lag). Cette approche permet l'hétérogénéité des coefficients à court terme entre les individus du panel mais contraint à l'homogénéité des coefficients de la relation de long terme à l'homogénéité. Autrement dit, l'estimateur PMG impose des relations de long terme commune entre les différents pays du panel, mais permet une hétérogénéité dans les réponses de court terme et dans les constantes.

Ainsi, à long terme, au niveau des différents pays du panel, une relation homogène doit exister entre les variables du modèle estimé alors que la dynamique de court terme peut être différente entre ces pays. Cela signifie que les coefficients de court terme (déviation

de la relation de long terme, l'ajustement) au niveau de chaque pays peuvent être différents alors que les coefficients de la relation de cointégration entre les variables seront communs à tous les pays du panel.

D'autre part, Il est impératif que le terme de correction d'erreur du modèle PMG soit de signe négatif et significativement différent de zéro. En outre, afin de surmonter le problème de la corrélation sérielle les résidus du modèle de correction d'erreur, il faut inclure des valeurs retardées des variables dépendantes et indépendantes dans le cadre d'un modèle ARDL (p, q) classique. Selon Pesaran et al. (1999), le modèle PMG/ARDL dans sa forme générale peut être exprimé comme suit :

$$y_{i,t} = \sum_{j=1}^{p} \eta_{i,j} y_{i,t-j} + \sum_{j=0}^{q} \delta'_{i,j} X_{i,t-j} + \mu_i + \varepsilon_{i,t} \quad (3.6)$$

L'équation de correction d'erreur correspondante sous forme reparamétrée peut être écrite comme suit :

$$\Delta y_{i,t} = \phi y_{i,t-1} + \beta'_i X_{it} + \sum_{j=1}^{p-1} \eta_{i,j} y_{i,t-j} + \sum_{j=0}^{q-1} \delta'_{i,j} X_{i,t-j} + \mu_i + \varepsilon_{i,t} \quad (3.7)$$

Où « $\phi = -(1 - \eta_i)$ » est le coefficient d'ajustement vers son équilibre de long terme et

$$\eta_{i,j} = -\sum_{m=j+1}^{p} \eta_{i,m}, \quad \text{with} \quad j = 1,2,3 \ldots p-1$$

$$\delta'_{i,j} = -\sum_{m=j+1}^{q} \delta'_{i,m}, \quad \text{with} \quad j = 1,2,3 \ldots q-1$$

Dans les équations (3.6) et (3.7), « *q* » et « *p* » sont le nombre de retards pour chaque pays et sont supposés être les mêmes dans tout le panel. En mettant l'équation (3.3) dans l'équation (3.6), on obtient la forme suivante pour un ARDL (1,1,1,1,1) :

$$\text{Ln}CO_{2it} = \alpha_i + \beta_{10i}\ln RE_{it} + \beta_{11i}\ln RE_{it-1} + \beta_{20i}\ln FE_{it} + \beta_{21i}\ln FE_{it-1} + \beta_{30i}\ln GDP_{it} + \beta_{31i}\ln GDP_{it-1} + \beta_{40i}\ln P_{it} + \beta_{41i}\ln P_{it-1} + \phi CO_{2\ i,t-1} + \varepsilon_{i,t} \quad (3.8)$$

L'équation de correction d'erreur correspondante pour un ARDL (1,1,1,1,1) pour l'équation (3.8) ci-dessus peut s'écrire comme suit :

$$\Delta\ln CO_{2it} = \phi_i(CO_{2i,t-1} - \omega_{0i} - \omega_{1i}\ln RE_{it} - \omega_{2i}\ln FE_{it} - \omega_{3i}\ln GDP_{it} - \omega_{4i}\ln P_{it}) + \beta_{11i}\Delta\ln RE_{it} + \beta_{21i}\Delta\ln FE_{it} + \beta_{31i}\Delta\ln GDP_{it} + \beta_{41i}\Delta\ln P_{it} + \varepsilon_{i,t} \quad (3.9)$$

$$ECT = CO_{2i,t-1} - \omega_{0i} - \omega_{1i}\ln RE_{it} - \omega_{2i}\ln FE_{it} - \omega_{3i}\ln GDP_{it} - \omega_{4i}\ln P_{it} \quad (3.10)$$

Dans l'équation (3.9), « $\phi$ » est le coefficient d'ajustement vers son équilibre de long terme ; « $\Delta$ » est l'opérateur de différence ; tandis que « $\varepsilon_{it}$ » est le terme d'erreur ; et « $\omega_i$ » sont les coefficients de long terme qui sont respectivement égaux à :

$$\omega_{0i} = \frac{\alpha_i}{1-\eta_i},$$

$$\omega_{1i} = \frac{\beta_{10i} + \beta_{11i}}{1-\eta_i},$$

$$\omega_{2i} = \frac{\beta_{20i} + \beta_{21i}}{1-\eta_i},$$

$$\omega_{3i} = \frac{\beta_{30i} + \beta_{31i}}{1-\eta_i},$$

$$\omega_{4i} = \frac{\beta_{40i} + \beta_{41i}}{1-\eta_i},$$

Dans l'équation (3.10), « *ECT* » est le terme de correction d'erreur pour chaque pays « *i* » au moment « *t* ». Une valeur négative et significative de la correction d'erreur indique que la relation de long terme existe, et que l'émission de carbone est cointégrée

avec toutes les variables indépendantes correspondantes (énergie renouvelable, énergie fossile, PIB et population). Si « $\phi = 0$ », alors il n'y a pas de relation de long terme entre les variables.

Outre la PMG, il existe deux autres méthodes, appelées Groupe moyen (MG), introduites par Pesaran et Smith (1995), et Effets Fixes Dynamiques (DFE) à utiliser pour analyser l'équation (3.9).

- L'estimateur « MG » mesure des équations de régression distinctes pour chaque section transversale et calcule ensuite la moyenne non pondérée des coefficients à partir des coefficients estimés pour chaque section transversale. L'estimateur « MG » n'impose aucune restriction et autorise des coefficients pour l'hétérogénéité à court terme et à long terme dans le panel. Bien que cette approche soit sensible à la taille de l'aberration et à la petite taille de l'échantillon. La dimension temporelle de l'échantillon doit être suffisamment grande que la dimension transversale pour remplir les conditions nécessaires de validité et de cohérence.
- Le « DFE » est en quelque sorte similaire à l'estimateur « PMG ». Cet estimateur impose des restrictions sur les coefficients à travers le panel et la variance des erreurs à long terme doit rester la même pour tous les individus du panel. L'estimateur « DFE » ne permet pas aux paramètres à court terme d'être hétérogènes. A l'aide de cet estimateur, nous pouvons estimer la corrélation intra-groupe avec une erreur standard. Mais il faut garder à l'esprit qu'en cas d'échantillon de petite taille, l'DFE présente un biais d'équations simultanées. Cela peut être dû à l'endogénéité entre la variable dépendante retardée et le terme d'erreur.

Le modèle PMG/ARDL a été sélectionné comme modèle approprié pour l'interprétation des résultats basés sur le test de Hausman. Le test de Hausman vérifie la pertinence du meilleur modèle parmi PMG, MG et DFE pour l'ensemble de données de panel correspondant.

L'hypothèse nulle du test d'Hausman vérifie l'homogénéité des paramètres de politique à long terme. Si les paramètres sont homogènes à long terme, les estimations PMG sont plus efficaces que MG et DFE. Cela signifie que la « PMG » est supérieure à la « MG » et à la « DFE ». La valeur de probabilité non significative (supérieur de 5%) indique que nous devons accepter l'hypothèse nulle de l'efficacité de « PMG » sur les autres méthodes.

**Tableau 3.4 : Résultats de test de Hausman**

| Test Estimates | Chi-square (4) | Probability > $Chi^2$ |
|---|---|---|
| MG vs PMG | 3.99 | 0.407 |
| DFE vs PMG | 0.00 | 1.000 |

Les résultats pour le test Hausman sont illustrés dans le tableau 3.4. Ceci peut être noté à partir des résultats que les valeurs de probabilité (0,407 et 1,000) dans les deux cas ne sont pas significatives à aucun niveau de signification. Donc nous ne pouvons pas rejeter l'hypothèse nulle. Et l'hypothèse nulle indique que PMG est supérieur aux deux autres méthodes.

Ainsi, on conclut que PMG est le modèle approprié dont les résultats sont relativement appropriés par rapport aux deux autres. Les paramètres de long terme et de court terme sont rapportés et interprétés uniquement pour le modèle PMG. Pour l'information supplémentaire, les estimations des modèles MG et DFE sont rapportées dans les annexes « 3.D » et « 3.E » respectivement.

Les résultats pour les paramètres de long terme sont présentés dans le tableau 3.5. Les résultats empiriques du modèle PMG/ARDL sont présentés en utilisant un maximum d'un seul retard pour toutes les variables par sélection automatique du critère d'information d'Akaike (AIC). Le modèle final sélectionné parmi les quatre est ARDL (1, 1, 1, 1, 1).

**Tableau 3.5 : Résultats de la régression PMG/ARDL**

**(Dépendent variable : $LCO_2$)**

| Variables | Coefficients | Std. Error | t-statistics | P-value |
|---|---|---|---|---|
| **Long Run Estimates** | | | | |
| **LRE** | -0.0632 | 0.0081 | -7.7764 | 0.000 |
| **LFE** | 0.7799 | 0.0180 | 43.179 | 0.000 |
| **LGDP** | 0.1827 | 0.0157 | 11.628 | 0.000 |
| **LPOP** | 0.1893 | 0.0463 | 4.0846 | 0.000 |
| **Short Run Estimates** | | | | |
| ECT(-1) | -0.4004 | 0.1127 | -3.5507 | 0.000 |
| D($LCO_2$(-1)) | -0.2499 | 0.0689 | -3.6259 | 0.000 |
| D(LRE) | 0.0511 | 0.0318 | 1.6050 | 0.109 |
| D(LRE(-1)) | 0.0077 | 0.0217 | 0.3571 | 0.721 |
| D(LFE) | 0.5135 | 0.0974 | 5.2702 | 0.000 |
| D(LFE(-1)) | 0.2629 | 0.0782 | 3.3602 | 0.000 |
| D(LGDP) | 0.0293 | 0.0798 | 0.3679 | 0.713 |
| D(LGDP(-1)) | -0.0135 | 0.0659 | -0.2055 | 0.837 |
| D(LPOP) | -0.7656 | 1.1549 | -0.6629 | 0.507 |
| D(LPOP(-1)) | -0.9332 | 1.4742 | -0.6330 | 0.527 |
| C | -3.6158 | 1.0171 | -3.5549 | 0.000 |

Il convient de noter que toutes les variables apparaissent sous forme de logarithme naturel et peuvent être interprétées comme l'élasticité de la variable dépendante à toute variation de cette dernière. Le signe positif d'un coefficient indique une association

directe tandis que le signe négatif indique l'association inverse. De la même manière, si le coefficient estimé est supérieur à 1, cela signifie que la variable dépendante est plus élastique à tout changement de la variable indépendante et l'inverse est vrai pour une valeur inférieure à 1.

Avant l'interprétation des résultats, il est obligatoire que le terme de correction d'erreur soit négatif et significatif. Le tableau 3.5 rapporte une valeur négative significative pour *ECT (-1)* qui remplit les exigences du modèle PMG/ARDL et démontre que le déséquilibre de chaque année précédente est corrigé pour l'année suivante correspondante.

Le coefficient de long terme (-0,0632) de l'énergie renouvelable apparaît négativement significatif. Cela signifie que la consommation d'énergie renouvelable et l'émission de carbone sont inversement proportionnelles. Le coefficient de l'énergie renouvelable peut être interprété comme une augmentation de 1% de la consommation d'énergie renouvelable réduira l'émission de carbone de 0,06%.

D'autre part, le coefficient à long terme de la consommation d'énergie fossile (0,7799) est positivement significatif avec une magnitude relativement plus grande que tout autre paramètre du modèle. Cela signifie qu'il existe une relation directe entre la consommation d'énergie fossile et l'émission de carbone. Une augmentation ou une diminution de 1% de la consommation d'énergie fossile modifiera le $CO_2$ dans la même direction avec une magnitude égale à son coefficient. Le coefficient de l'énergie fossile est assez important par rapport au coefficient de l'énergie renouvelable, ce qui nous indique que l'émission de carbone est fortement associée à l'énergie fossile par rapport à toutes les autres variables incluses dans le modèle.

De la même manière, le coefficient du PIB est non seulement positif mais aussi significatif avec une magnitude légèrement inférieure à celle de l'énergie fossile. Cela signifie que la croissance économique est le processus d'activités économiques rigoureuses qui provoquent des émissions. Plus particulièrement si ces activités économiques sont réalisées à l'aide de la consommation d'énergie fossile, alors l'émission de carbone sera plus élevée que dans le cas de l'énergie renouvelable. Ce résultat confirme que la qualité de l'environnement se dégrade avec le processus de croissance et de développement économique. Enfin, nous pouvons observer que le coefficient de la population est également positif et significatif. Cela peut être interprété comme une augmentation de 1% de la population qui augmente les émissions de carbone de 0,18%. Le coefficient de la population est légèrement supérieur à celui de la production intérieure brute, ce qui nous indique que l'augmentation de la population est plus responsable des émissions que la croissance économique. Cela s'explique par le fait qu'une population plus importante consomme plus d'énergie et qu'une consommation d'énergie plus élevée entraîne une plus grande pollution (émission). Sur la base de nos résultats, nous pouvons affirmer que ces émissions seront plus élevées si la proportion de consommation d'énergie fossile est supérieure à la consommation d'énergie renouvelable.

Le coefficient à court terme de l'énergie renouvelable est positif mais non significatif, tandis que pour l'énergie fossile, il est à nouveau positif et significatif. Ces résultats montrent que l'impact de la transition énergétique n'est pas immédiatement visible à court terme, mais qu'il faut une période relativement plus longue pour réduire les émissions. Il y a peu de temps que les Etats membres européens ont pris des initiatives fortes pour la transition énergétique. Tous les Etats membres n'ont pas complètement adopté les énergies renouvelables ; les énergies fossiles restent la source dominante de

production d'énergie. L'impact de l'énergie renouvelable peut éventuellement être vu une fois qu'elle devient la source d'énergie dominante.

**Tableau 3.6 : L'analyse à court terme spécifique à chaque pays**

| Country | ect(-1) | ΔRE | ΔFE | ΔGDP | ΔPOP | Constant |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Austria | -0.624*** | 0.3046*** | 0.5059*** | -0.278*** | 0.5167 | -5.6950 |
| Belgium | -0.069*** | 0.0165*** | 0.8178*** | 0.1707** | -1.6994 | -0.6261 |
| Bulgaria | -0.380*** | 0.2431*** | 0.8038*** | -0.642*** | 1.1017 | -3.4125 |
| Croatia | -0.132*** | 0.2431*** | 0.1725 | -0.0761 | -1.8516 | -1.2492 |
| Czech | -0.785*** | 0.0086 | 0.2441** | -0.0303 | -5.4127 | -7.0179 |
| Denmark | -0.364*** | -0.018*** | 0.7597*** | -0.3341** | 1.8637 | -3.2851 |
| Estonia | -0.473*** | 0.0652** | 0.1789** | 0.2407** | -8.3815 | -4.6895 |
| Finland | -0.633*** | -0.274*** | 0.3041*** | 0.3934** | -8.9104 | -5.6564 |
| France | -0.024*** | -0.204*** | 0.6514*** | 0.7006*** | 1.2805 | -0.2609 |
| Germany | -0.232*** | -0.186*** | 1.0131*** | 0.1866*** | 0.0473 | 2.1315 |
| Hungary | -0.6055** | 0.0526*** | 0.2964*** | 0.0087 | -2.9683 | -5.5044 |
| Ireland | -0.0388 | -0.043*** | 0.8179*** | 0.0091 | 5.3625 | -0.3546 |
| Italy | -0.257*** | 0.1428*** | 0.7041*** | 0.0845 | -1.3226 | -2.4224 |
| Latvia | 0.6930** | 0.1853*** | 1.6331 | -0.0444 | -0.4880 | 6.4310 |
| Lithuania | -0.498*** | 0.0584** | 0.3443 | 0.3457** | -3.3015 | -6.4696 |
| Luxembourg | -0.2762** | 0.0045 | 1.0670*** | -0.1780 | -0.1529 | -2.4704 |
| Poland | -0.086*** | -0.030*** | 0.6422*** | -0.0235 | -0.2646 | -0.7770 |
| Portugal | -0.493*** | 0.125*** | 0.7937*** | -0.0508 | -10.743 | -4.5087 |
| Slovakia | -0.362*** | -0.011** | 0.473*** | 0.3054*** | 4.3583 | -3.2200 |
| Slovenia | -0.253*** | 0.278*** | 0.810*** | -0.437*** | 3.8689 | -2.26** |
| Spain | 0.2448*** | -0.11*** | 0.766*** | 0.9536*** | -1.2549 | 2.25*** |
| Sweden | 0.0326 | 0.379*** | 0.198*** | 0.4870*** | -19.127 | 0.2495 |
| *, **, *** montre que la signification à 10%, 5%, 1% | | | | | | |

Outre l'analyse de panel, nous avons également effectué une analyse transversale à court terme spécifique à chaque pays, illustrée dans le tableau 3.6. Une légère différence peut être observée entre ces résultats et l'analyse de panel pour certaines petites économies,

comme la Croatie, l'Estonie, la Lettonie et la Lituanie, etc. Pour certains pays, soit l'énergie renouvelable est insignifiante, soit elle apparaît avec un signe positif. Pour certains pays, soit l'énergie renouvelable est insignifiante, soit elle apparaît avec un signe positif. Cela peut être justifié par le fait que ces petites économies n'ont pas encore montré de progrès significatif vers la transition vers les énergies renouvelables. C'est pourquoi son impact n'est pas facile à percevoir avec précision. De la même manière, toute variable peut apparaître négative à court terme et positive à long terme car le résultat ne peut être ressenti qu'après une longue période. Par exemple, la croissance du revenu peut avoir un impact négatif sur la qualité de l'environnement à court terme, mais au-delà d'un seuil de revenu, elle peut conduire à l'amélioration de l'environnement à long terme. Et c'est ce dont parle la théorie de la courbe de Kuznets environnementale.

D'autre part, les grandes économies comme l'Allemagne, la France, l'Irlande, la Finlande, etc. ont suffisamment progressé vers la décarbonisation des activités économiques et l'impact de la consommation d'énergie renouvelable sur la réduction des émissions de carbone est plus clair pour elles que pour toutes les économies qui sont à la traîne dans cette course. Le coefficient de l'énergie renouvelable est négativement significatif pour ces économies. En outre, la consommation d'énergie fossile contribue davantage aux émissions de carbone, tant à court terme qu'à long terme. Son coefficient est suffisamment important et significatif pour tous les pays. De même, le coefficient de la population est supérieur au produit intérieur brut, ce qui prouve une fois de plus que la croissance démographique contribue davantage à la pollution environnementale que la croissance économique. De l'analyse du panel, nous pouvons déduire que la réduction des émissions de carbone et la lutte contre le changement climatique ne sont pas des phénomènes spécifiques à un pays ou à une région, mais qu'il s'agit d'un problème

mondial qui peut être abordé avec une forte compréhension mutuelle, notamment entre les principales économies consommatrices d'énergie.

## 6. Discussion et implications politiques

Les résultats de notre étude ont des implications politiques significatives. Nous avons constaté que la consommation d'énergie fossile constitue la principale source d'émission de carbone et son coefficient de corrélation apparaît significativement positif avec une magnitude largement plus grande que les autres coefficients du modèle, en particulier le coefficient des énergies renouvelables.

La raison principale est que l'énergie fossile reste toujours la principale source d'énergie en Europe. Nous avons vu que différents types de mesures politiques ont été adoptés pour limiter l'augmentation de la température mondiale, mais la collaboration internationale doit encore faire l'objet d'une attention particulière.

Le scénario de zéro émission nette de carbone à l'échelle mondiale est scientifiquement fondé et la température continuera à augmenter tant que les sources de température et leurs contre-mesures ne seront pas égales (Kaufman et al. 2020).

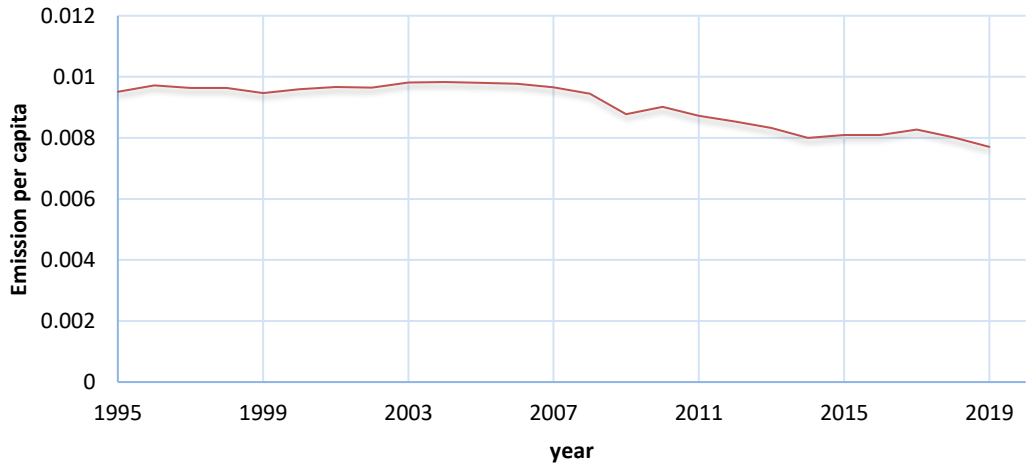
Si l'on ne parvient pas à atteindre les objectifs de zéro émission nette, la température augmentera plus rapidement et pourra atteindre un niveau incontrôlable. Par conséquent, les objectifs ne peuvent être atteints qu'au prix d'efforts collectifs, indépendamment de toute région ou juridiction.

Le rôle des plus grands émetteurs comme les États-Unis, la Chine, la Russie, le Japon et l'Inde peut faire une énorme différence. De même, la réduction des émissions carbone dans le secteur de l'énergie n'est pas seulement liée aux émissions de carbone, mais aussi à celles d'autres gaz comme le méthane qui doivent également être limités (AIE 2021).

Le transfert de technologies des pays développés vers les pays sous-développés ou en développement doit se faire sans aucun délai.

Mais, contrairement au reste du monde, les émissions de carbone par habitant ont tendance à diminuer au sein de l'Union Européenne, ce qui témoigne d'une relative réussite de leur stratégie climatique de décarbonation de leurs mix-énergétiques, en particulier les initiatives fortes que ces pays ont prises afin de mettre en œuvre le pacte vert (Green deal) (voir figure 3.8).

**Figure 3.8: Emission de carbone par habitant (MMTOE)**



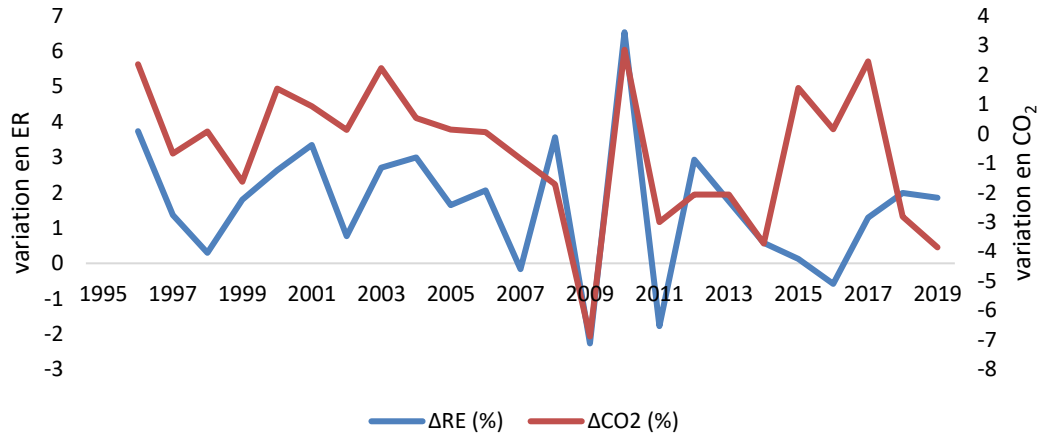

*Source : Simulation des auteurs*

L'augmentation de la part des énergies renouvelables et l'amélioration de l'efficacité énergétique sont utiles pour atteindre une émission nette de carbone nulle (IRENA 2021). Les résultats de notre étude montrent que le déploiement des énergies renouvelables réduit les émissions de carbone. Tout au long de l'analyse, le coefficient d'énergie renouvelable apparaît négativement corrélé aux émissions de carbone avec une magnitude persistante. Cela montre que la transition vers les énergies renouvelables peut contribuer à atténuer le changement climatique. Bien que l'objectif de l'émission nette zéro carbone ne soit pas facile à réaliser, il est impératif de déployer massivement et à un rythme beaucoup plus rapide de telles technologies efficaces en énergie.

Notons que l'UE a en registré suffisamment de progrès dans le déploiement des énergies renouvelables et continue à le faire du moment qu'elle s'est fixée comme objectif de produire 75 % de son électricité d'ici à 2030 et 92 % d'ici à 2050 à partir de sources renouvelables.

Ce qui correspond une croissance annuelle d'environ 12 % qui permettra d'injecter 130 TWh par an dans le système électrique européen pendant les 10 prochaines années (Climact 2020).

**Figure 3.9: Variation en $CO_2$ vs Variation en RE**




*Source : Simulation des auteurs*

Selon l'Agence internationale de l'énergie, il faudra ajouter 630 GW d'énergie solaire photovoltaïque et 390 GW d'énergie éolienne d'ici 2030. La figure 3.9 montre les variations en pourcentage du déploiement des énergies renouvelables (ainsi que les variations des émissions de carbone de 1995 à 2019.

On peut observer que la variation des émissions de carbone est fortement corrélée à la variation des ressources renouvelables installées.

Dans l'annexe 3.B, nous avons illustré la représentation graphique des tendances des émissions $CO_2$ et des capacités d'énergies renouvelables installées pour les huit plus grandes économies de l'UE. Cette représentation montre clairement que l'augmentation

continue du déploiement des énergies renouvelables contribue à la diminution des émissions carbone. En particulier, chez les pays qui remplacent le charbon par des sources renouvelables, les tendances des 2 variables sont parfaitement inversées, bien que les émissions soient encore légèrement stables pour les économies où le charbon constitue encore une source dominante de production d'électricité.

La baisse des émissions carbone s'accompagne également d'une diminution de la consommation de combustibles fossiles. De plus, il est possible d'observer, à partir du mix énergétique de ces grandes économies (voir l'annexe 3.C), que la part des énergies thermiques conventionnelles diminue et est progressivement remplacée par des sources d'énergie renouvelables.

La croissance globale de la production des énergies renouvelables entre 1995 et 2019 s'élève à 46,91 %, tandis que la baisse des émissions de carbone pour la même période est de 13,98 %. La croissance annuelle moyenne de la consommation d'énergies renouvelables s'élève à 1,61 %, tandis que la baisse annuelle moyenne des émissions de carbone est de 0,62 %.

Ces statistiques mettent en évidence le fait que si les énergies renouvelables contribuent largement à la réduction des gaz à effet de serre, elles ne pourraient pas réaliser cet objectif à elles seules. En effet, si la transition énergétique se fait au rythme du business as usual (BAU), il faudra environ un siècle pour atteindre les objectifs de pacte vert (Green deal). C'est pourquoi le rythme de déploiement des énergies renouvelables devrait être augmenté d'au moins 12 % pour atteindre les objectifs de baisse des émissions carbone à l'horizon 2030 et 2050.

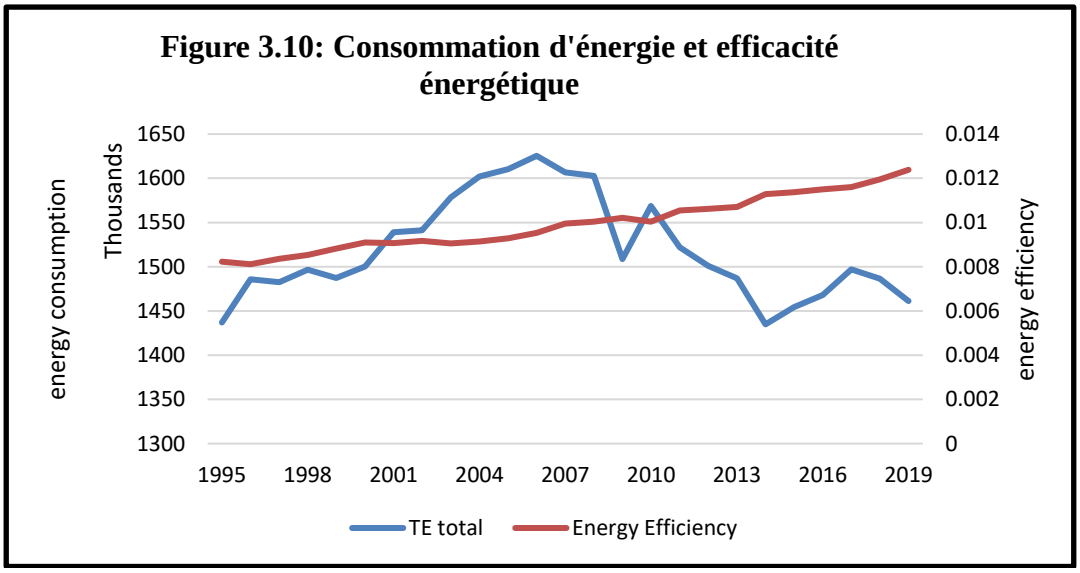
En outre, les contributions des citoyens de l'union Européenne sont primordiales puisque la transition énergétique entraînera inévitablement des répercussions sur leur

vie quotidienne à plusieurs égards, comme le changement des modes de chauffage et de cuisson, de mobilité en particulier l'abandon des voitures et l'utilisation du vélo et des transports publics. Dans ce cas, des changements dans le mode de vie de ces citoyens doivent être acceptés sur une base individuelle.

En ce qui concerne la consommation finale d'énergie dans l'UE, la consommation totale d'énergie avait tendance à augmenter jusqu'en 2006 avant d'entamer une diminution après cette date. Mais la consommation d'énergie par unité de PIB a diminué et continue de diminuer.

La figure 3.10 montre que grâce à l'introduction de technologies à haut rendement énergétique (plus efficaces énergétiquement), les besoins énergétiques par unité de PIB sont en baisse, indépendamment de la consommation totale d'énergie.

**Figure 3.10: Consommation d'énergie et efficacité énergétique**




*Source : Simulation des auteurs*

Il est donc fortement recommandé d'adopter des technologies respectueuses de l'environnement afin de réduire les émissions de carbone et donc leurs impacts négatifs. Par conséquent, la contribution des citoyens ordinaires est donc très importante parce que leurs choix de technologies efficaces en énergie peuvent faire une énorme différence quant à l'évolution des émissions carbone.

Notons que les objectifs de l'Union Européenne en matière de réduction des émissions sont difficiles à atteindre, mais leur réalisation n'est pas impossible. Les politiques publiques doivent permettre d'accélérer le rythme de déploiement des technologies d'énergie propre dans le système énergétique européen sans perturber le mode de vie existant des États membres qui sont en retard dans leur processus de transition énergétique.

Ce qui signifie que les nouvelles installations de production d'énergie ne devraient être autorisées que pour les énergies renouvelables et que la dépendance à l'égard des énergies fossiles devrait être progressivement abandonnée. Ainsi, l'électrification du secteur des transports et le soutien aux bus de transport fonctionnant à la bioénergie/éthanol pourraient jouer un rôle essentiel dans la réduction des émissions de carbone.

Certains États membres comme la France, l'Allemagne, la Belgique, les Pays-Bas, etc. ont pris des initiatives fortes et ont accéléré la transition en modifiant le mode de vie de leurs citoyens. Ils fournissent des aides financières aux personnes afin de les inciter à acquérir des vélos électriques afin de le dissuader d'utiliser leurs voitures personnelles.

En France, les transports publics intra-urbains fonctionnent à l'électricité ou à l'éthanol (bus récemment déployés). Les citoyens sont incités à utiliser les transports publics en leur offrant des réductions de coûts d'abonnement.

Les mêmes politiques publiques peuvent être observées dans d'autres grands États européens ; le changement climatique est un phénomène mondial qui exige des efforts collectifs dans le monde entier.

Une transition énergétique bien menée contribuera non seulement à réduire les émissions carbones, mais également à réduire le coût de l'énergie à moyen et long terme, à garantir la sécurité énergétique, l'amélioration de l'état de santé, la qualité de l'air, la protection de la biodiversité et la restauration de l'écosystème naturel.

Une telle transition doit rendre le secteur de production de l'électricité 100 % indépendant de la production à base de charbon. A titre d'illustration, l'Autriche, la Belgique, le Portugal et la Suède sont sortis de charbon et douze autres pays européens se sont engagés à l'abandonner progressivement d'ici 2030 ou plus tôt. Cependant, la Bulgarie, la Croatie, la République tchèque, la Pologne, la Roumanie et la Slovénie n'ont pas fixé de délais spécifiques pour sortir du charbon. Ces pays doivent mettre en œuvre des politiques énergétiques dont l'objectif serait d'éliminer complètement toute production d'énergie à base de charbon.

## 7. Conclusion

L'objectif de la présente étude consiste à examiner le potentiel de la contribution des énergies renouvelables à l'objectif de la réduction des émissions de carbone au sein de l'Union européenne.

Nous avons désagrégé la consommation d'énergie en énergies renouvelables et en énergies fossiles afin d'examiner leurs effets individuellement. Pour cela nous avons choisi un panel de 25 pays de l'UE comme échantillon pour effectuer notre analyse empirique. Nos données de panel allant de 1995 à 2019 ont été extraites de la base de données de l'Energy information administration. Nous avons adopté l'estimateur Pooled Mean group pour mesurer les paramètres de court terme et de long terme.

Le test de Hausman a été utilisé pour confirmer l'adéquation du modèle choisi. En outre, à l'aide d'une analyse graphique, nous avons discuté les résultats de notre étude pour les implications politiques.

Nous avons constaté que la contribution de la consommation d'énergies fossiles aux émissions de carbone a une magnitude beaucoup plus large que celle d'autres variables (PIB, Population), à la fois à court et à long terme. En outre, les coefficients de corrélation du revenu national (PIB) et de la population avec les émissions carbone sont de signe positif, ce qui signifie que la croissance de l'activité économique et de la population provoque une hausse des émissions carbone.

A l'opposé, le coefficient de corrélation des énergies renouvelables est significatif et a un signe négatif ; ce qui met en évidence que l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans la consommation totale d'énergie contribuerait à réduire les émissions de carbone. Notons, que cet effet baissier des énergies renouvelables sur l'émission carbone est de moindre amplitude que l'effet haussier des énergies fossiles.

D'après les résultats de notre étude, nous pouvons déduire que la transition vers les énergies renouvelables et l'amélioration de l'efficacité énergétique peuvent rendre réel le rêve d'une émission nette de carbone nulle.

Ainsi, afin d'atteindre l'objectif de réduction des émissions d'ici 2030, une croissance annuelle de 12 % du déploiement des énergies renouvelables serait nécessaire au cours des dix prochaines années. Cette étape serait relativement plus difficile à franchir, mais faciliterait la réalisation d'émissions nettes nulles (neutralité carbone) d'ici 2050.

Tout retard enregistré dans cette transition vers 2030 pourrait rendre la deuxième phase de transition vers la neutralité carbone en 2050 très difficile et la température pourrait atteindre un niveau qu'il serait difficile de faire baisser.

Comme l'évolution des émissions de carbone n'est pas unitairement élastique par rapport à l'évolution de la croissance des énergies renouvelables, il faut déployer de plus en plus d'énergies propres.

Une élimination complète de la consommation de charbon est une nécessité absolue pour atteindre ces objectifs ambitieux. Certains États membres de l'UE ont déjà procédé à une élimination progressive du charbon de leur mix énergétique et d'autres sont en train de le faire.

Mais, les efforts fournis par l'Union européenne seraient insuffisants si d'autres grands pays n'y participent pas massivement à cette réduction des émissions carbones. Il s'agit en particulier de la Chine (le plus grand consommateur de charbon au monde), des États-Unis (la deuxième place sur la liste), le rôle de ces États, de la Russie, de l'Inde et du Japon.

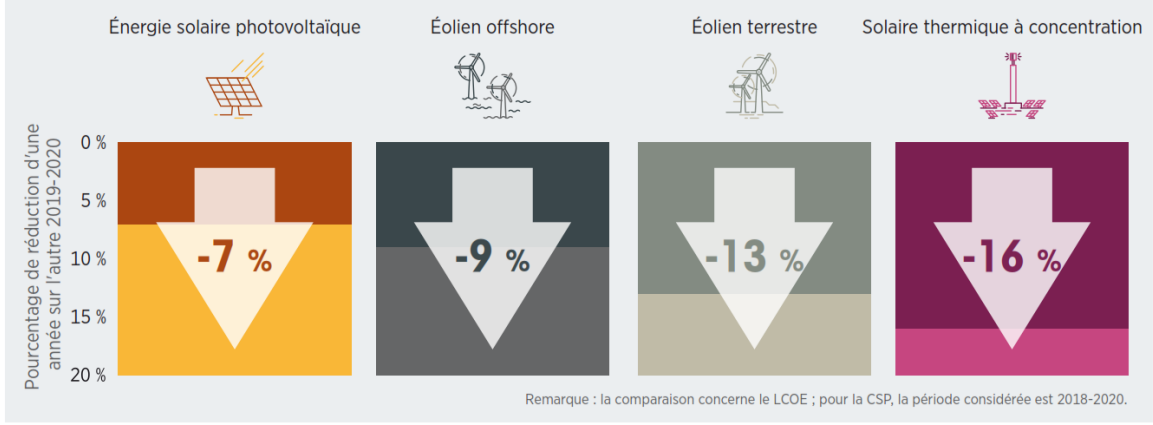
Les recherches futures devraient se concentrer sur :

- La convergence régionale vers le déploiement des énergies renouvelables et l'efficacité énergétique.
- De même, la mesure dans laquelle l'énergie propre contribue à la réduction des émissions devrait également être étudiée dans d'autres parties du monde.
- La mesure de la sécurité énergétique durable dans les États membres de l'UE peut également être un domaine de recherche future.

- Les options de financement d'une transition énergétique complète doivent également être étudiées, en particulier dans les pays moins développés, et les chercheurs doivent s'efforcer de trouver la solution optimale.

# Annexe 3

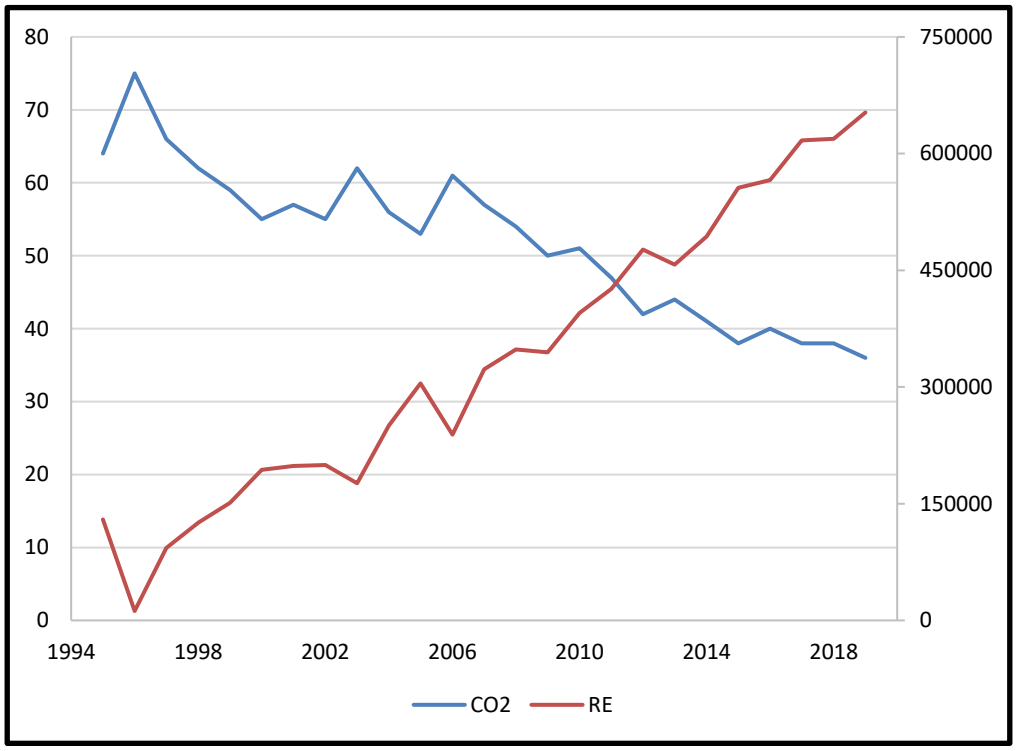
## Annexe 3.A : Moyenne pondérée mondiale du LCOE des nouvelles technologies solaires et éoliennes à échelle industrielle mises en service, 2019-2020



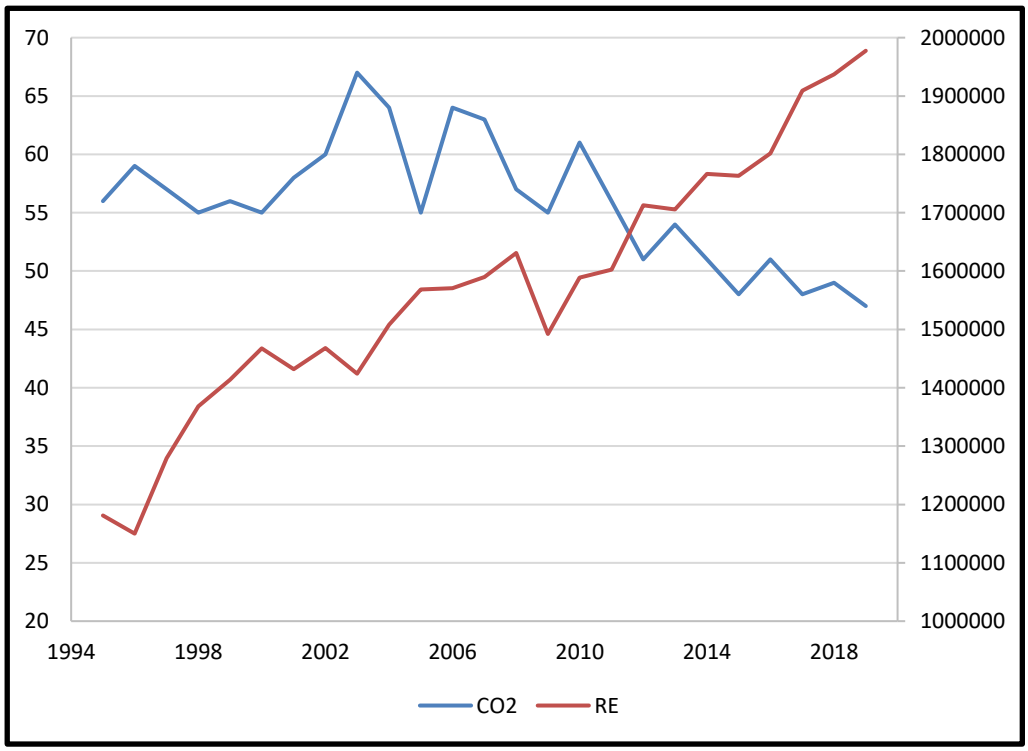

*Source : Base de données des coûts des énergies renouvelables de l'IRENA*

## Annexe 3.B : Tendances du $CO_2$ (en bleu) et des énergies renouvelables (en rouge)

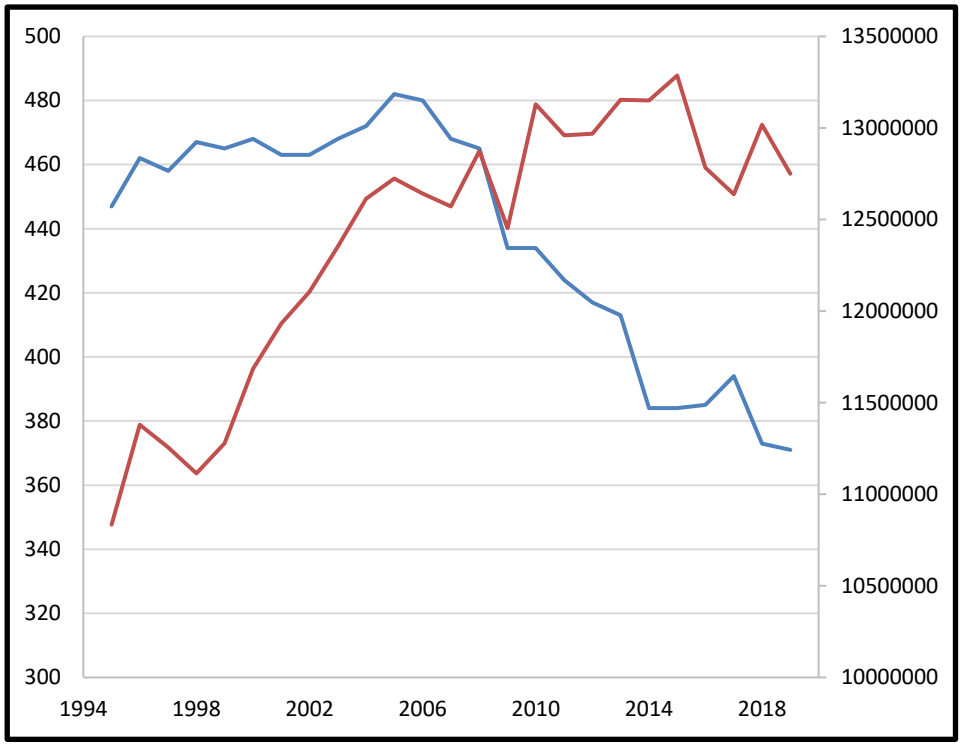
- **Danemark**



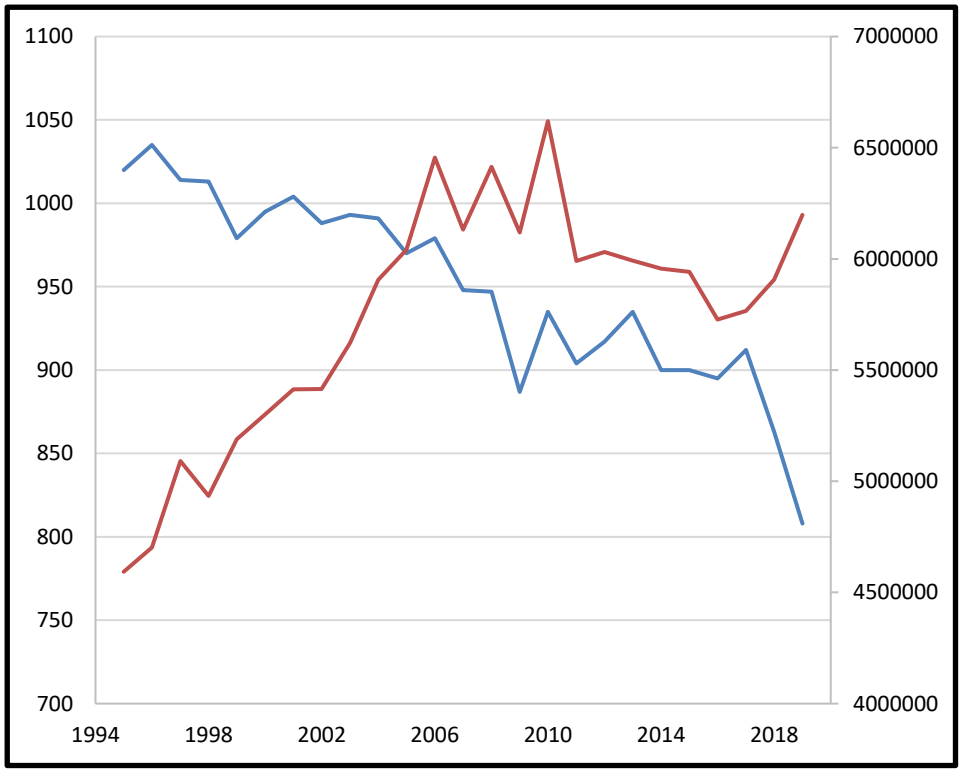

- **Finlande**



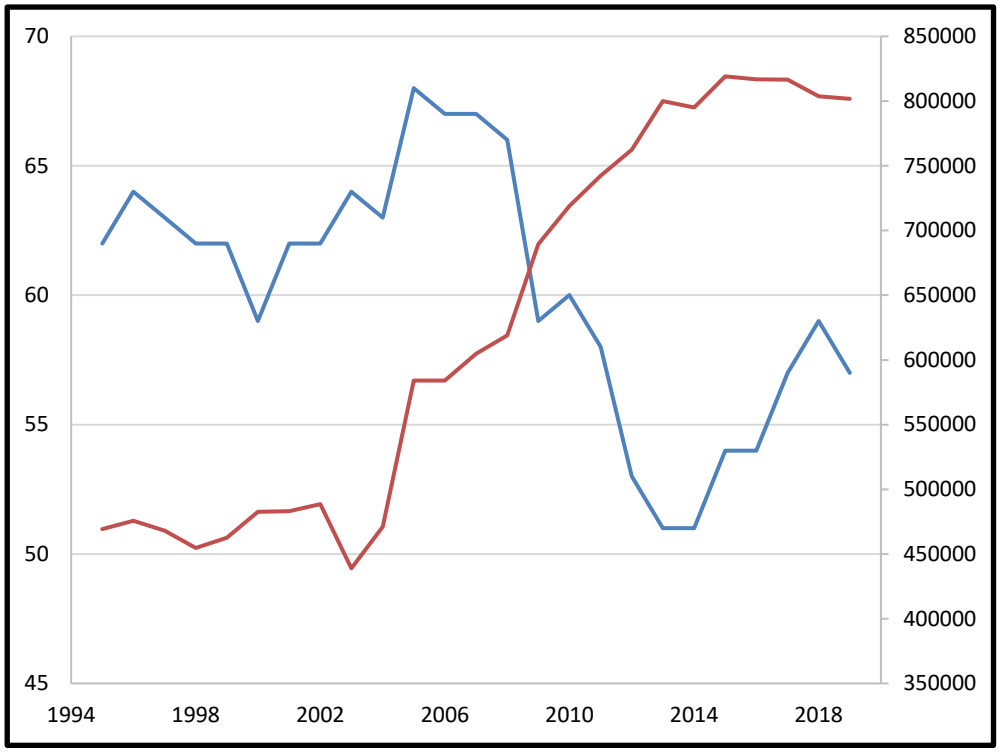
- **France**



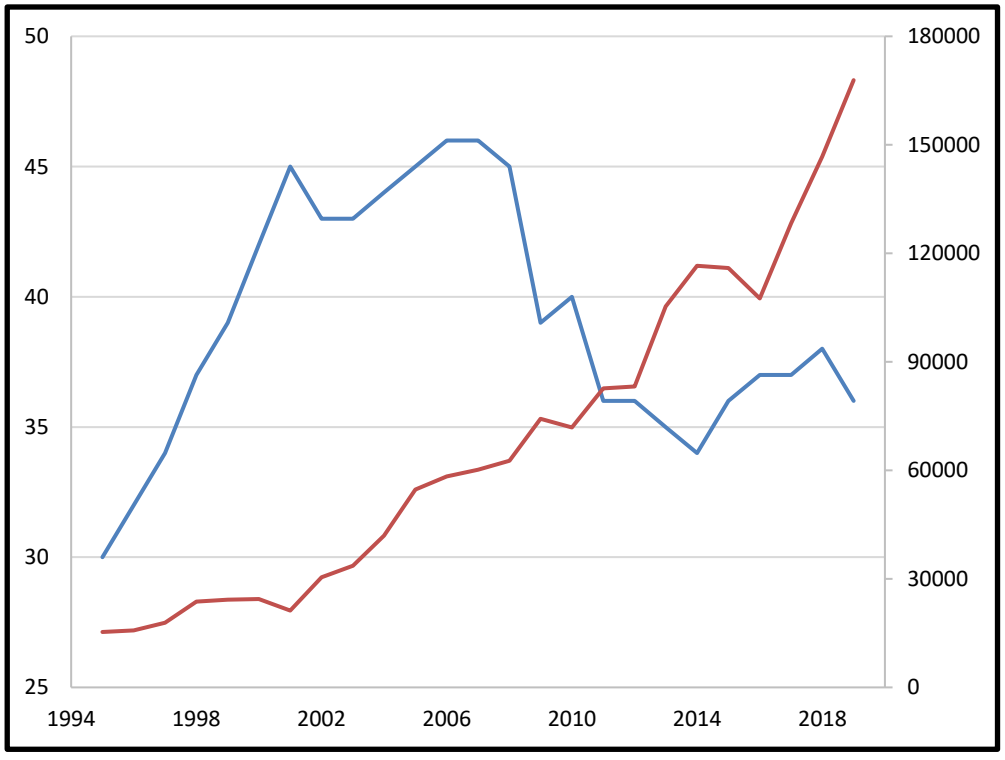

- **Allemagne**



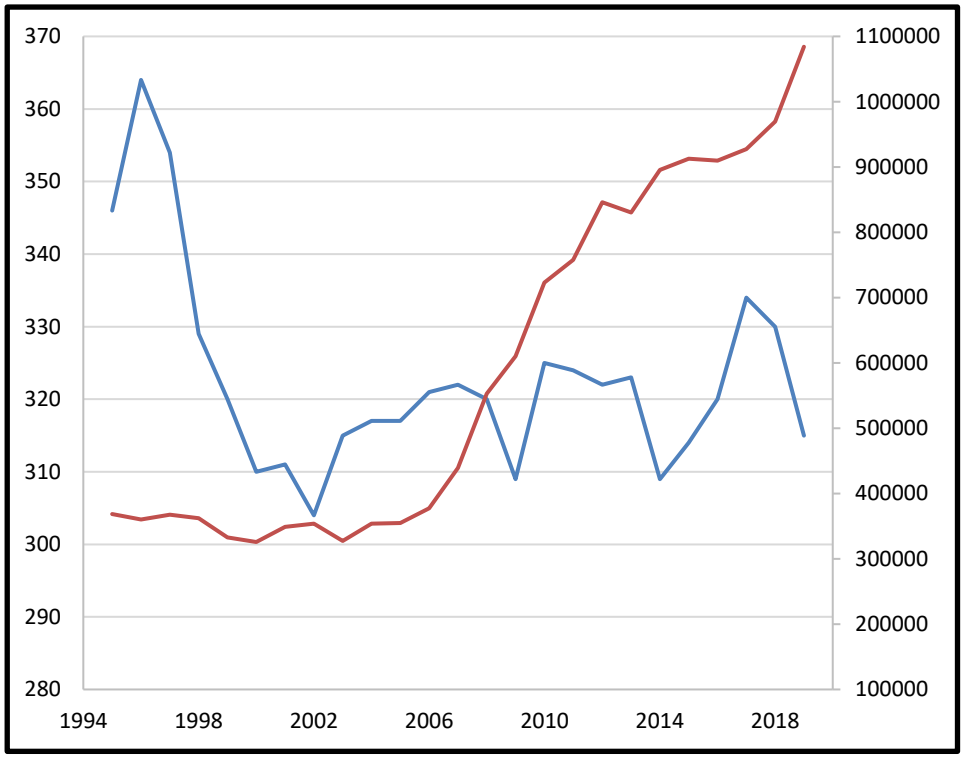
- **Hongrie**



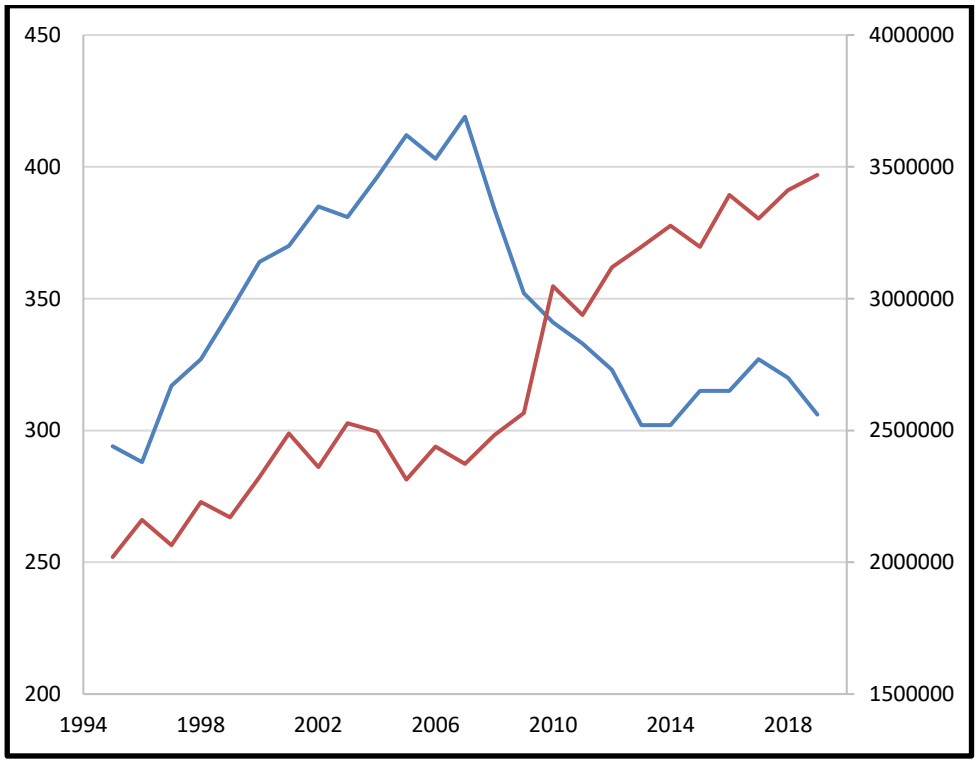

- **Irlande**



- **Pologne**

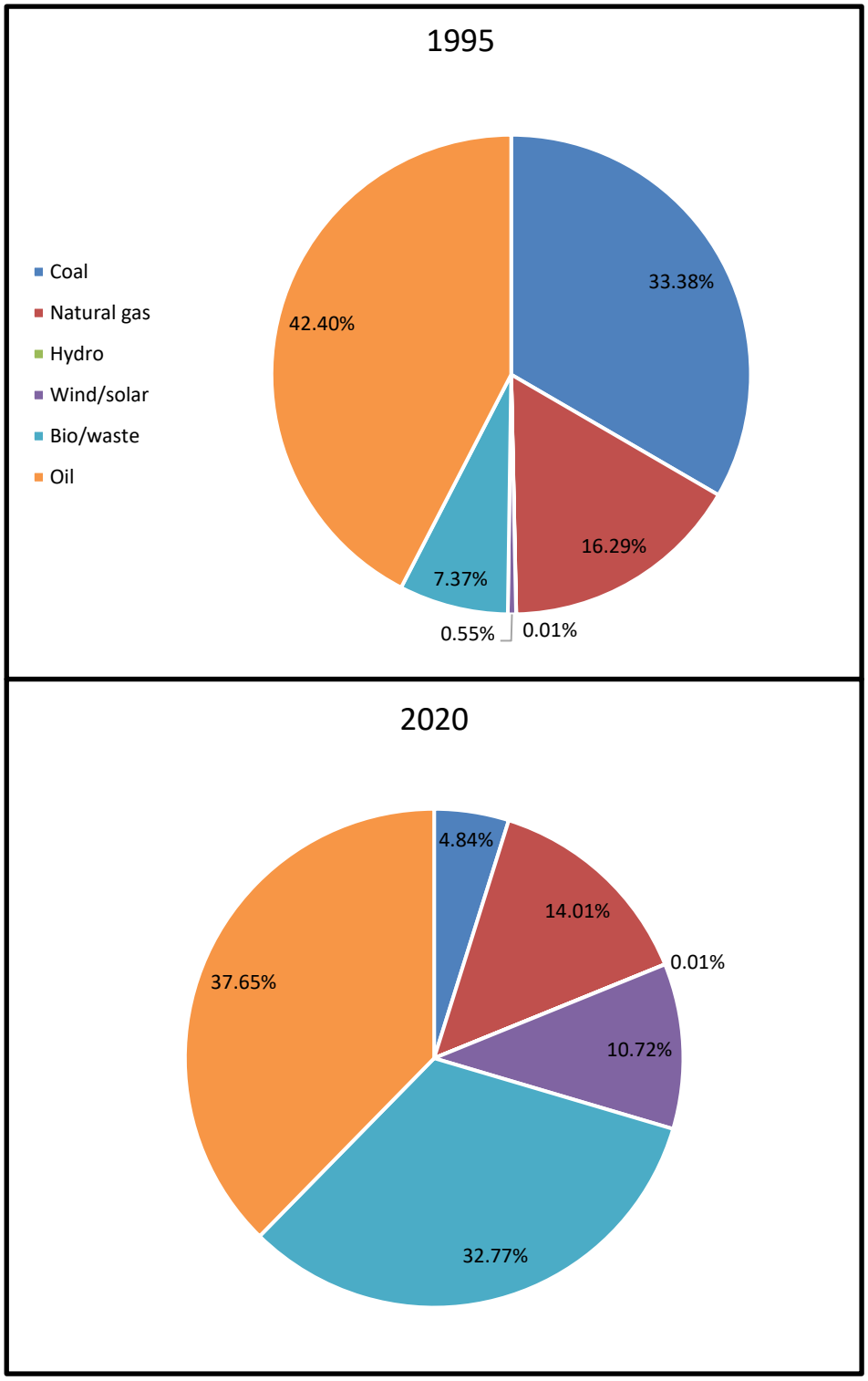



- **Espagne**

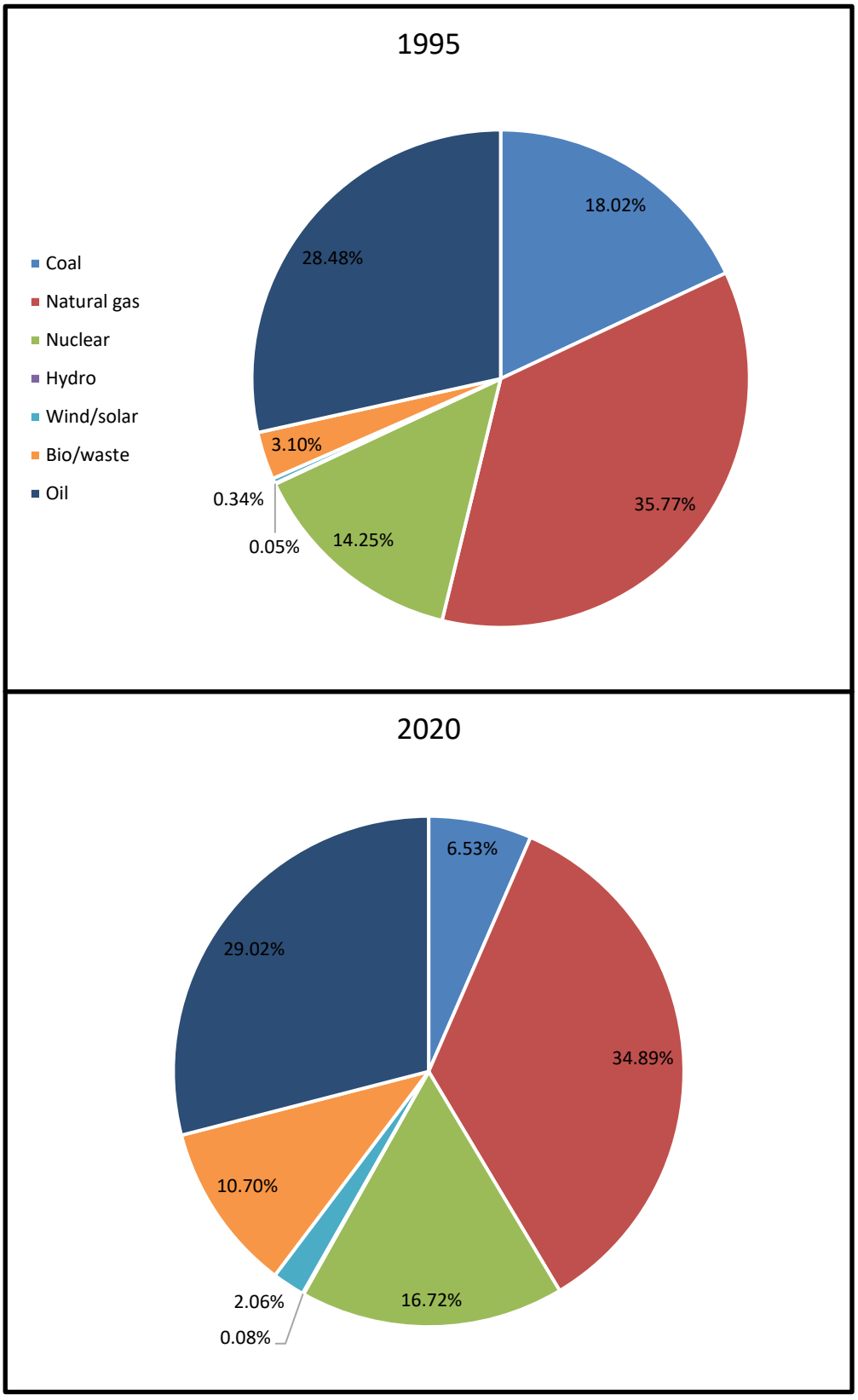


## Annexe 3.C : Mix énergétique des huit premières économies de l'UE

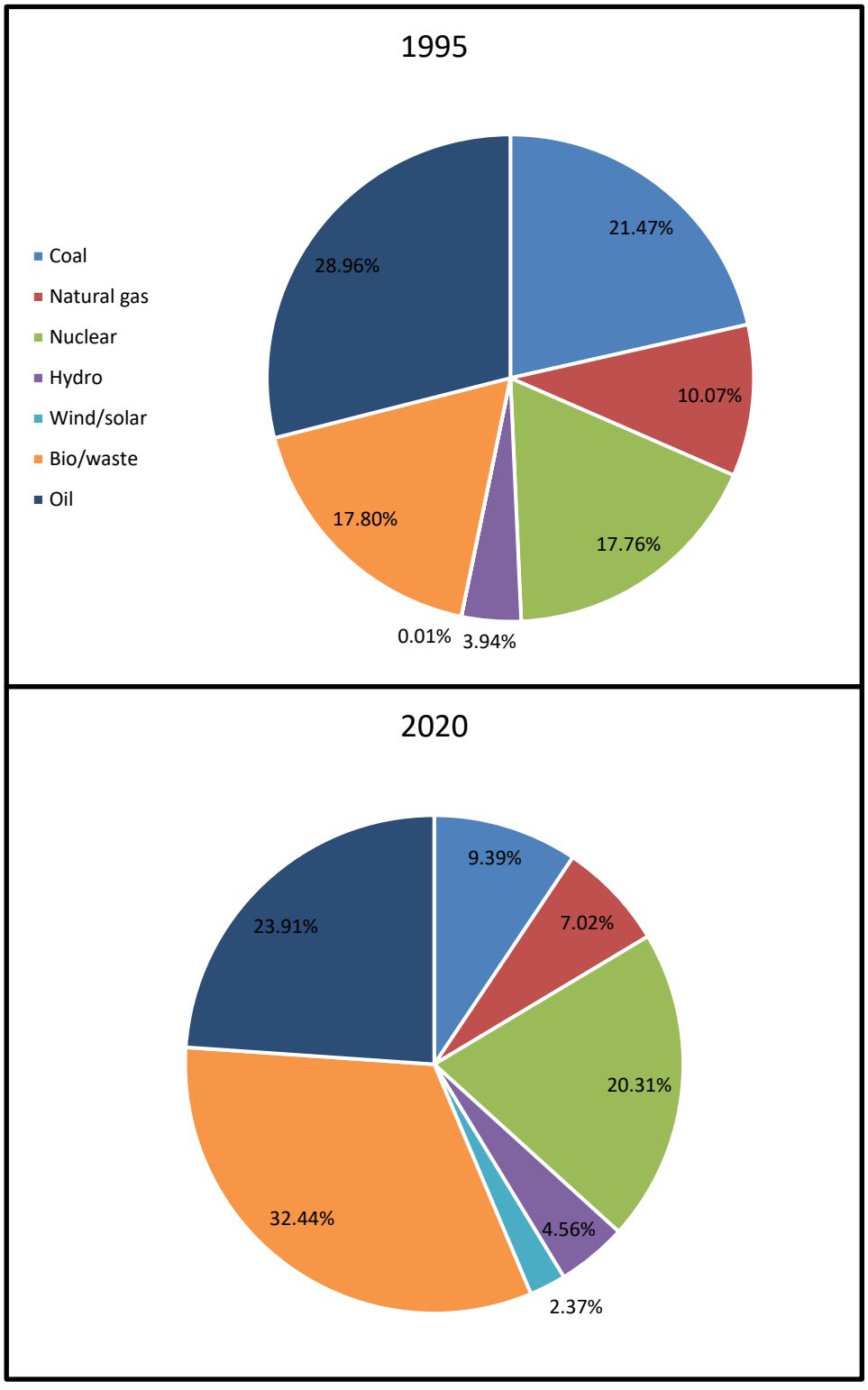
- **Danemark**



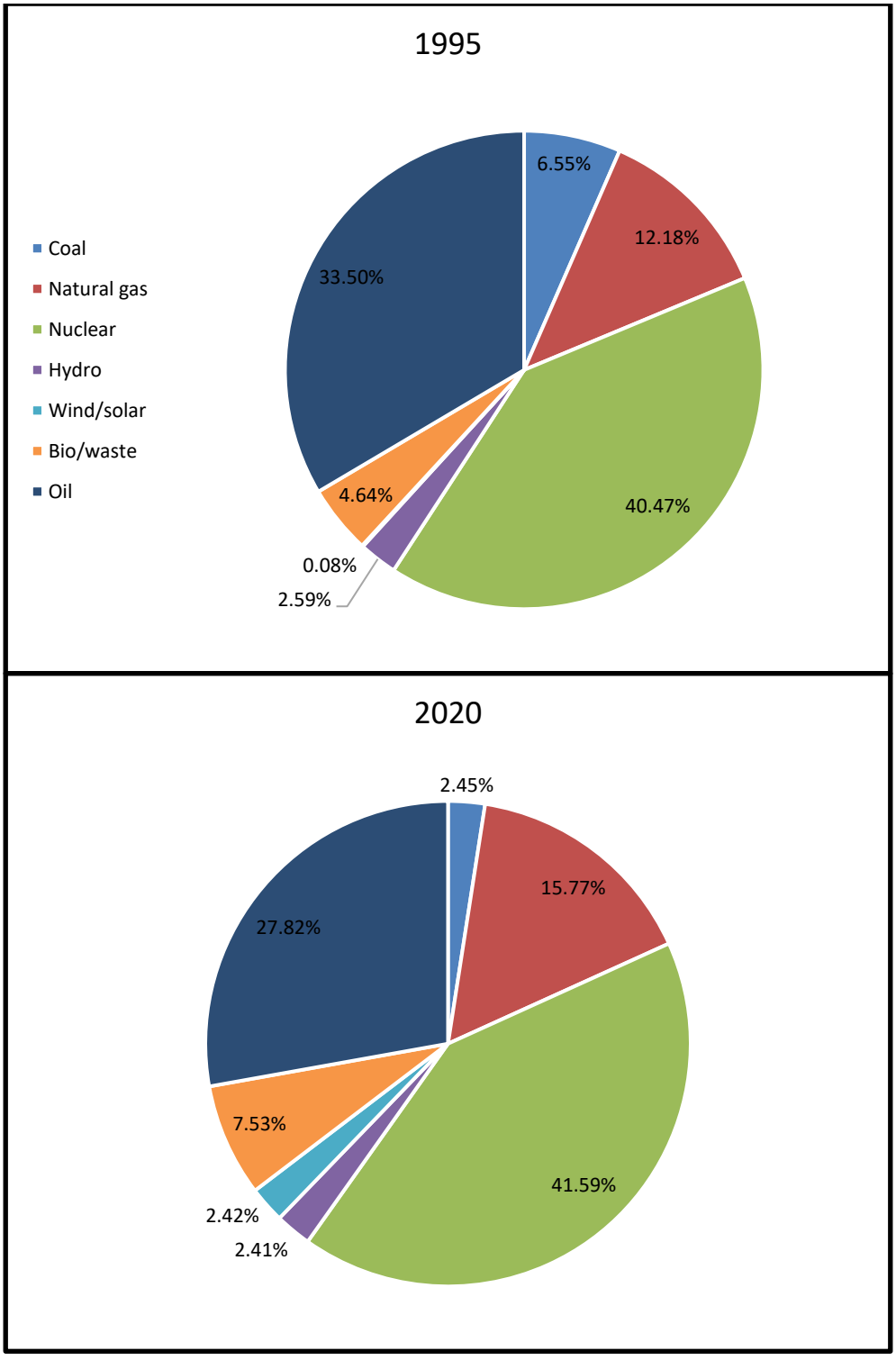
- **Hongrie**


1995
Coal
Natural gas
Nuclear
Hydro
Wind/solar
Bio/waste
Oil
18.02%
35.77%
14.25%
0.05%
0.34%
3.10%
28.48%
2020
6.53%
34.89%
16.72%
0.08%
2.06%
10.70%
29.02%

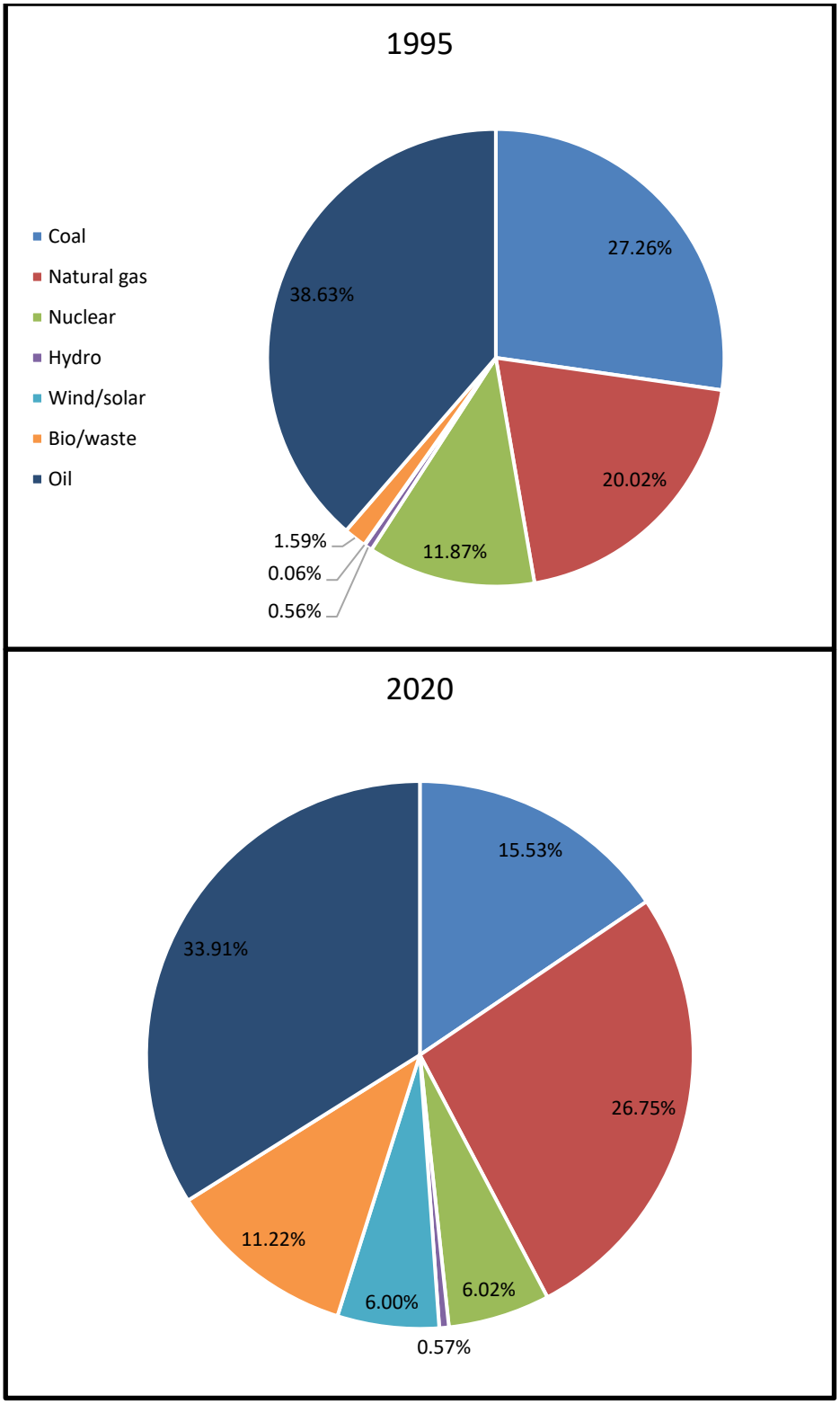
- **Finlande**


1995
Coal
Natural gas
Nuclear
Hydro
Wind/solar
Bio/waste
Oil
21.47%
10.07%
17.76%
3.94%
0.01%
17.80%
28.96%
2020
9.39%
7.02%
20.31%
4.56%
2.37%
32.44%
23.91%

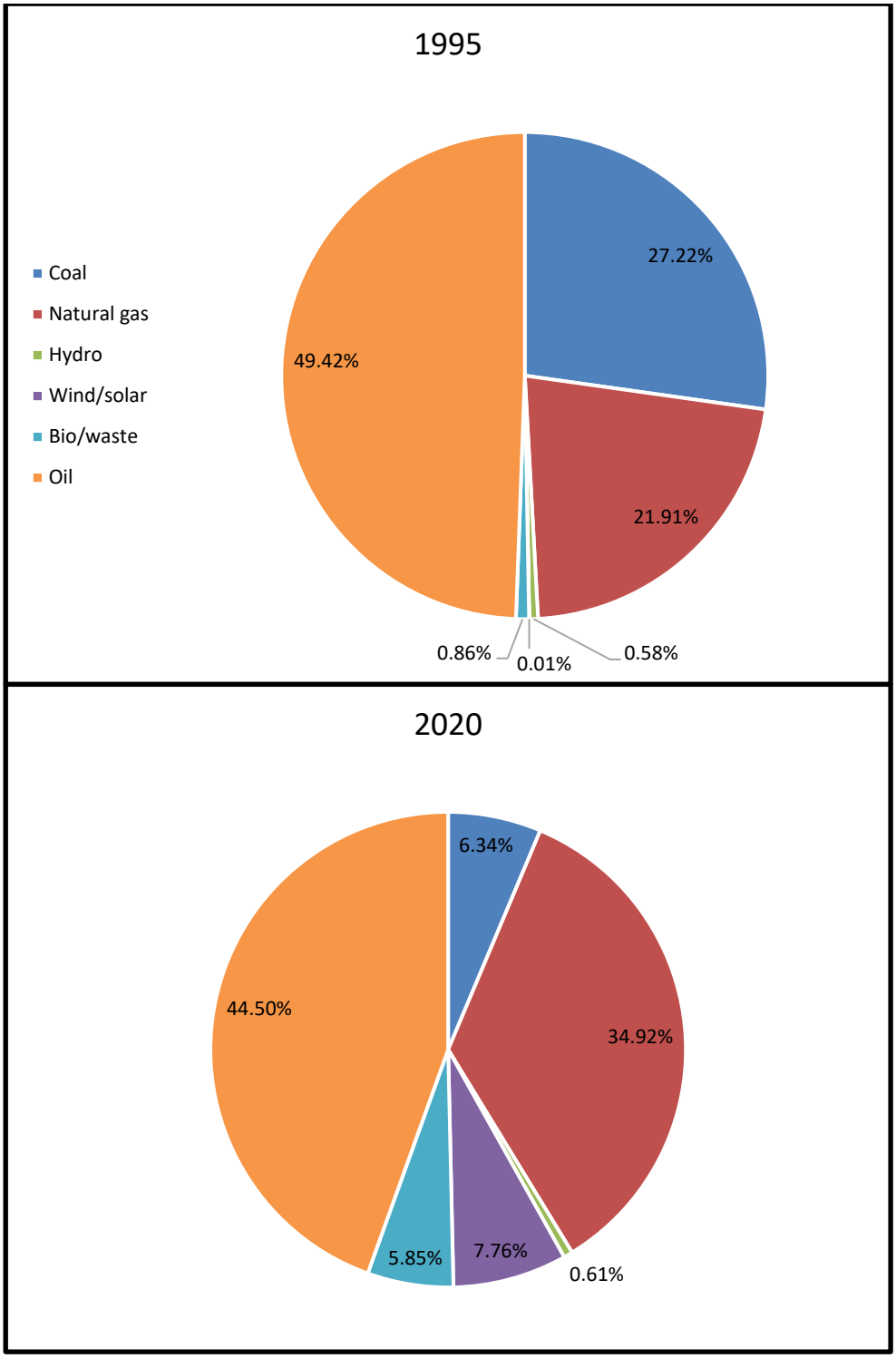
- **France**


1995
Coal
Natural gas
Nuclear
Hydro
Wind/solar
Bio/waste
Oil
6.55%
12.18%
33.50%
4.64%
40.47%
0.08%
2.59%
2020
2.45%
15.77%
27.82%
7.53%
41.59%
2.42%
2.41%

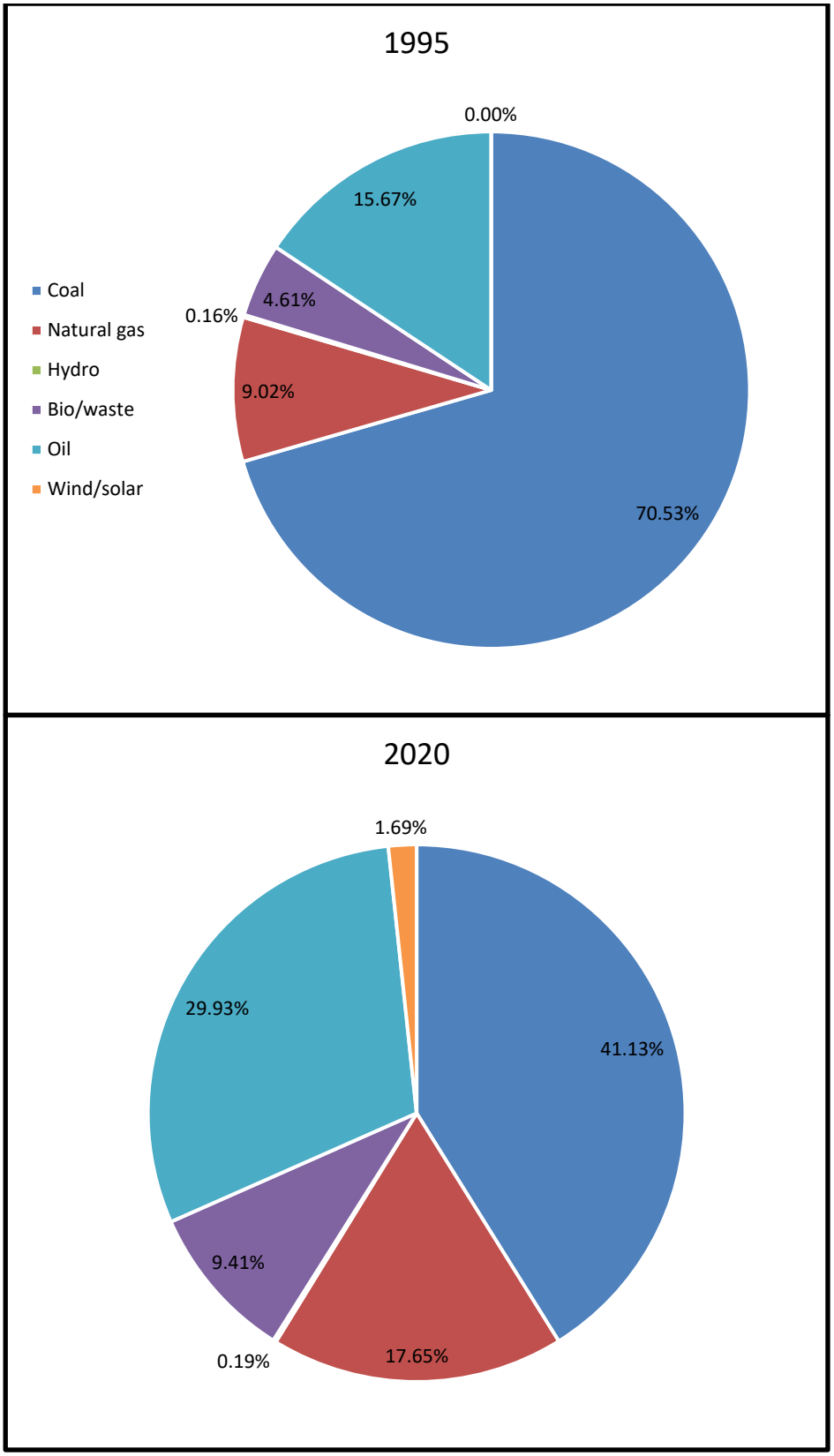
- **Allemagne**


1995
Coal
Natural gas
Nuclear
Hydro
Wind/solar
Bio/waste
Oil
27.26%
20.02%
11.87%
1.59%
0.06%
0.56%
38.63%
2020
15.53%
26.75%
6.02%
0.57%
6.00%
11.22%
33.91%

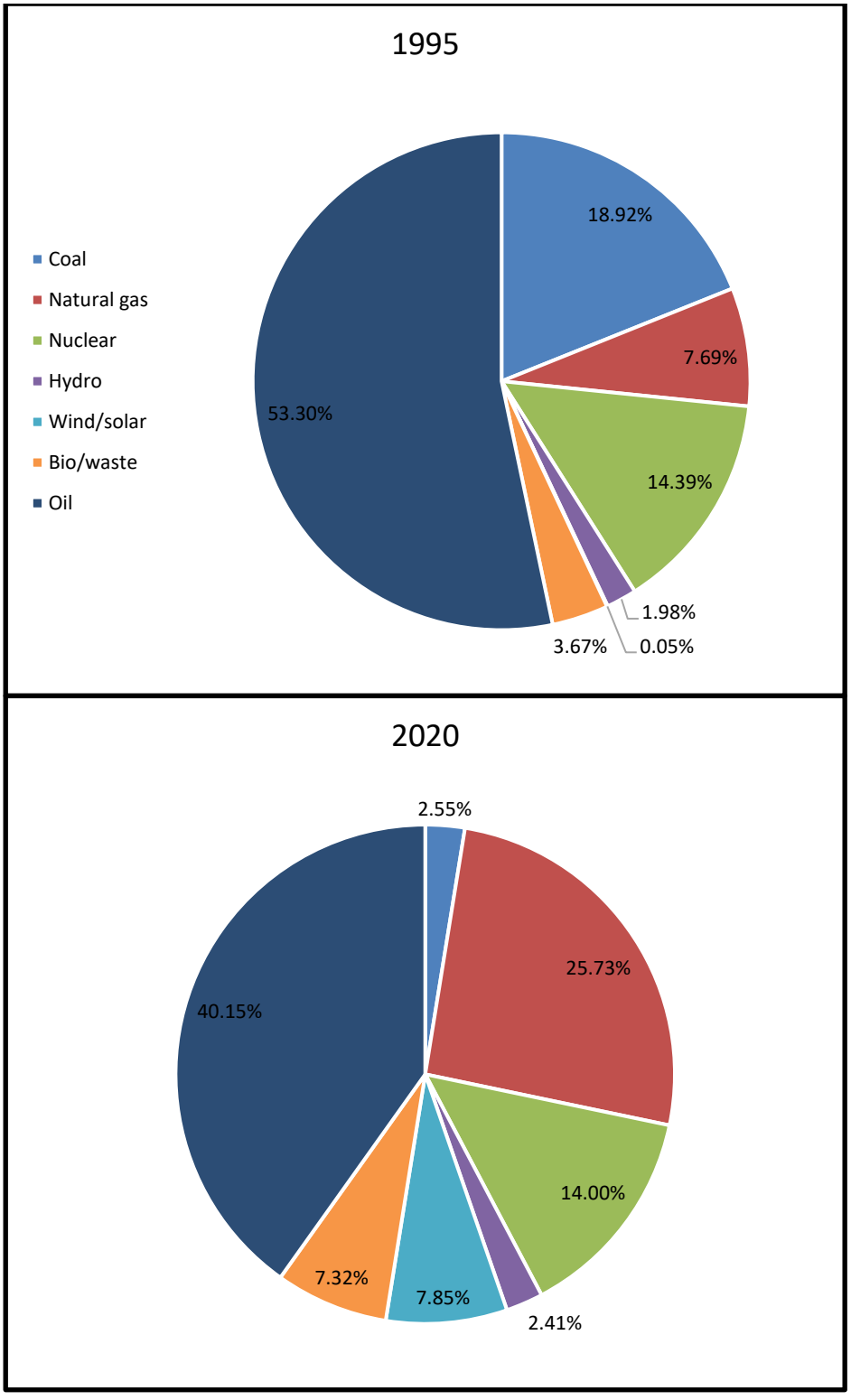
- **Irlande**


1995
Coal
Natural gas
Hydro
Wind/solar
Bio/waste
Oil
27.22%
21.91%
0.58%
0.01%
0.86%
49.42%
2020
6.34%
34.92%
0.61%
7.76%
5.85%
44.50%

- **Pologne**


1995
0.00%
15.67%
4.61%
0.16%
9.02%
70.53%
Coal
Natural gas
Hydro
Bio/waste
Oil
Wind/solar
2020
1.69%
29.93%
41.13%
9.41%
0.19%
17.65%

- **Espagne**


1995
Coal
Natural gas
Nuclear
Hydro
Wind/solar
Bio/waste
Oil
18.92%
7.69%
14.39%
1.98%
0.05%
3.67%
53.30%
2020
2.55%
25.73%
14.00%
2.41%
7.85%
7.32%
40.15%

**Annexe 3.D : Estimations moyennes du groupe**

| Variables | Coefficients | Standard Error | t-statistics | P-value |
|---|---|---|---|---|
| **Long Run Estimates** | | | | |
| LRE | 0.0465 | 0.0271 | 1.72 | 0.086 |
| LFE | 0.9324 | 0.0573 | 16.26 | 0.000 |
| LGDP | -0.0806 | 0.0601 | -1.34 | 0.180 |
| LPOP | 0.0852 | 0.0852 | 0.24 | 0.814 |
| **Short Run Estimates** | | | | |
| ECT | -1.0307 | 0.0463 | -22.25 | 0.000 |
| D(LRE) | 0.0494 | 0.0243 | 2.04 | 0.042 |
| D(LFE) | 0.8688 | 0.0558 | 15.56 | 0.000 |
| D(LGDP) | 0.0450 | 0.0598 | 0.75 | 0.452 |
| D(LPOP) | 0.6441 | 0.9955 | 0.65 | 0.518 |
| C | -11.1045 | 3.8491 | -2.88 | 0.004 |

**Annexe 3.E : Estimations dynamiques à effets fixes**

| Variables | Coefficients | Standard Error | t-statistics | P-value |
|---|---|---|---|---|
| **Long Run Estimates** | | | | |
| LRE | -0.0063 | 0.0142 | -0.44 | 0.658 |
| LFE | 0.9175 | 0.0340 | 26.94 | 0.000 |
| LGDP | 0.0-256 | 0.0199 | -1.29 | 0.198 |
| LPOP | -0.0689 | 0.0671 | -1.03 | 0.305 |
| **Short Run Estimates** | | | | |
| ECT | -0.4833 | 0.0363 | -13.28 | 0.000 |
| D(LRE) | -0.0101 | 0.0099 | -1.02 | 0.310 |
| D(LFE) | 0.7595 | 0.0303 | 25.00 | 0.000 |
| D(LGDP) | 0.1117 | 0.0491 | 2.28 | 0.023 |
| D(LPOP) | 0.0665 | 0.3452 | 0.19 | 0.847 |
| C | -4.0517 | 0.4478 | -9.05 | 0.000 |

# Conclusion générale

Afin d'explorer la validité empirique de la courbe de Kuznets environnementale (EKC), nous avons fait appel à une méta-analyse qui consiste en examen approfondi de la littérature empirique en faisant appel à des outils méthodologiques innovants. En effet, nous avons utilisé un large échantillon de données constitué de 101 articles de recherche publiés et mobilisant la régression MNL pour estimer les paramètres.

Notre contribution à la littérature relative à l'EKC est double : Premièrement, nous avons développé un nouveau cadre PRIMRA, qui est une extension du cadre PRISMA (Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analysis) développé par Moher et al. (2009). Le cadre PRIMRA (Preferred reporting items for Meta Regression analysis) nous a fourni les lignes directrices utiles pour effectuer notre méta-analyses de l'EKC. Deuxièmement, nous avons essayé de lever l'ambiguïté concernant l'existence de l'EKC grâce à une large utilisation de divers tests de signification et de robustesse qui renforcent la validité empirique des résultats. En effet, l'un des résultats le plus important de notre analyse est la validation de l'EKC, et ce quelques soient le choix de l'échantillon de données, des variables de contrôle et de la méthodologie économétrique.

On peut en déduire que la croissance économique conduira d'abord à la détérioration de la qualité de l'environnement mais qu'au-delà du certain seuil de revenu par tête, elle améliorera sa qualité, bien que l'atteinte de ce niveau de revenu souhaité ne soit possible qu'à long terme, et non à court terme.

D'autre part, comme l'augmentation de la population est associée à une utilisation excessive des ressources et à une augmentation de la pollution. Les résultats de cette étude reconnaissent l'impact négatif de la croissance démographique sur la qualité de

l'environnement. En outre, la consommation d'énergie est également nuisible puisqu'elle entraîne des émissions toxiques et une dégradation de l'environnement.

Contrairement à la littérature empirique, nous avons observé que le choix de la méthodologie économétrique ne joue pas de rôle significatif dans la détermination de ces impacts négatifs de la croissance démographique et de la consommation d'énergie sur la qualité de l'environnement, bien que l'estimateur MG/PMG soit apparu robuste.

Notons que la question la plus importante mise en évidence par l'examen de la littérature empirique est de savoir comment mesurer la pollution environnementale. Différents types d'indicateurs ont été utilisés dans la littérature. Nous avons constaté que les résultats quant à l'existence d'une EKC sont sensibles au choix des indicateurs de pollution environnementale. Ainsi, les mesures liées à l'activité humaine sont plus susceptibles de soutenir l'existence d'une EKC, tandis que les indicateurs chimiques et biologiques tendent à affaiblir la validité l'existence de l'EKC.

La validation empirique de nos résultats a été renforcée grâce à l'utilisation de tests de robustesse pré- et post-estimation. Tout d'abord, le modèle a été sélectionné en utilisant le test LR qui recommande l'utilisation d'un modèle restreint au lieu d'un modèle non restreint. Les coefficients estimés peuvent interprétés de trois façons : les rapports impairs, les RRR et les ME moyennes. Dans une large mesure, les résultats sont restés les mêmes et ont été confirmés par l'utilisation du test de Wald pour la signification individuelle des coefficients. En outre, l'hypothèse d'indépendance des alternatives non pertinentes (IIA) de la régression logistique multinomiale (MNL) a également été validée en utilisant le test de Hausman et McFadden. Ce qui augmente la fiabilité des résultats.

Nos résultats de notre analyse ont des implications politiques à long terme, au niveau de national, au niveau régional (union européenne par exemple) et mondial. En effet, nous avons constaté que la consommation d'énergie a un impact négatif sur la qualité de l'environnement. Il est donc indispensable d'adopter des politiques publiques qui incitent à l'utilisation de technologies efficaces et réduisent les émissions carbones. D'autre part, la capacité existante de la terre à absorber cette émission carbone devrait également être améliorée en augmentant la couverture forestière.

Sur la base de nos résultats, on peut déduire que la qualité de l'environnement s'améliorera lorsque toutes les nations auront achevé le processus de développement à long terme. Mais, beaucoup de questions se posent : est-il possible pour les pays du monde entier de se développer et d'atteindre ce seuil de revenu par tête à partir duquel la croissance économique ne se traduit plus par une hausse de la dégradation de l'environnement ? Si oui, alors pourquoi parle-t-on d'urgence climatique ? Pourquoi le monde est-il trop conscient du changement climatique et de ses impacts dramatiques ? Y a-t-il un problème dans le processus de développement ou les économies des pays en voie de développement convergent-elles très lentement ? Les ressources naturelles disponibles sont-elles suffisantes pour survivre jusqu'à ce que le monde atteigne ce fameux seuil de revenu par tête ?

Enfin, la consommation d'énergie a toujours eu un impact négatif sur l'environnement et il est nécessaire de passer des énergies fossiles aux énergies renouvelables. Bien que ce passage ne soit pas une tâche facile et qu'il ait un impact négatif sur la croissance du PIB, les recherches futures devraient se concentrer sur l'étude de l'impact de l'énergie sur l'environnement. Les recherches futures devraient donc se concentrer sur l'étude de la manière dont les énergies renouvelables peuvent contribuer à atténuer le changement

climatique sans affecter la croissance. En gardant à l'esprit le scénario d'émission nette de carbone zéro de l'accord de Paris jusqu'en 2050.

Dans le cadre du chapitre 2, nous avons examiné de manière empirique la courbe de Kuznets environnementale pour 22 pays européens au cours de la période allant de 1995 à 2015.

Comme il est nécessaire d'adopter un indicateur de dégradation de l'environnement qui soit plus complet, nous avons pris l'empreinte écologique comme mesure de la qualité de l'environnement qui prend en compte non seulement les émissions de $CO_2$ mais aussi la déforestation, la réduction des pâturages et des cultures, et la perte d'espèces de poissons.

Sur le plan méthodologique, nous avons examiné l'existence d'un éventuel problème de dépendance transversale en faisant appel au test CD de Pesaran (2004). En présence d'une dépendance transversale dans le panel de données, des tests de racine unitaire de deuxième génération, IPS augmenté transversalement et ADF transversalement, doivent être utilisés pour vérifier l'ordre d'intégration des variables utilisées dans notre modèle. Afin de vérifier si la relation de long terme (cointégration) est présente ou non, les tests de cointégration de Pedroni (2007) et de Kao (1999) ont été utilisés. Les paramètres de long terme ont été estimés à l'aide d'estimateurs de groupe de moyenne commune (PMG) et de groupe de moyenne augmentée (AMG), tandis que la robustesse des résultats a été vérifiée par les estimateurs de moindres carrés ordinaires dynamiques (DOLS) et de moindres carrés ordinaires entièrement modifiés (FMOLS).

Nos résultats empiriques ont montré qu'il existe une relation quadratique entre la croissance des revenus et la qualité de l'environnement. Au cours des premières étapes de la croissance des revenus, la qualité de l'environnement est impactée négativement.

Cette dégradation concerne la pollution de l'air, de l'eau, de la terre, et est associée à la déforestation. Cela s'explique par le fait qu'au début, de plus en plus de ressources sont nécessaires pour alimenter le processus de croissance économique. D'autre part, avec un faible niveau de revenu, il est également quasi-impossible d'engager des technologies avancées et d'investir davantage dans des améliorations environnementales. Mais, une fois qu'un seuil de revenu par tête soit atteint, des effets positifs sur l'environnement apparaissent de façon croissante avec l'augmentation du revenu. Cela s'explique par le fait que l'économie a le potentiel de s'offrir des technologies plus avancées et plus efficaces et que les gens sont relativement disposés à payer pour accéder à un environnement plus propre.

Les résultats de notre analyse montrent que la consommation d'énergie est apparue comme ayant des effets négatifs sur l'environnement, car elle contribue directement aux émissions carbones et à la pollution atmosphérique. A l'opposé, la croissance démographique ne joue aucun rôle significatif dans la détermination de la valeur réelle de la qualité de l'environnement au niveau des pays européens. Cela indique que la croissance démographique ne constitue pas un défi aussi grave comparativement aux économies en voie de développement.

Les estimations à long terme ont été validées par une analyse de robustesse en employant une série de méthodes économétriques avancées. Enfin, l'analyse de causalité indique également qu'il existe une causalité unidirectionnelle entre le PIB et l'empreinte écologique et une causalité bidirectionnelle entre la consommation d'énergie et l'empreinte écologique.

Les résultats de cette étude ont des implications importantes. Tout d'abord, le modèle de consommation d'énergie devrait être radicalement modifié afin d'éviter les émissions de

carbone et la pollution atmosphérique. Les économies devraient se détourner des sources d'énergie conventionnelles au profit de technologies plus avancées et plus vertes. Cela nécessitera des investissements relativement plus importants dans les énergies renouvelables et l'arrêt progressif de la consommation de combustibles fossiles. Deuxièmement, l'amélioration de l'environnement n'est pas l'affaire d'un seul pays, ni même un ensemble de pays comme l'union européenne mais nécessite des efforts collectifs à l'échelle mondiale.

Dans le chapitre 3, nous avons examiné le potentiel des sources d'énergie renouvelables à réduire les émissions de carbone, nous avons désagrégé la consommation d'énergie en énergie renouvelable et en énergie fossile pour examiner leurs effets individuellement. Les pays de l'UE-25 ont été choisis comme échantillon en données de panel allant de 1995 à 2019, extraites de la base de données de l'Energy information administration. Nous avons adopté l'estimateur Pooled mean group pour mesurer les paramètres à court terme et à long terme. Le test de Hausman a été utilisé pour confirmer l'adéquation du modèle choisi. En outre, à l'aide d'une analyse graphique, nous avons discuté les résultats de notre étude pour les implications politiques.

Nous avons constaté que la consommation d'énergie fossile contribue relativement plus aux émissions de carbone que les autres variables incluses dans le modèle, à la fois à court et à long terme. D'autre part, le coefficient des énergies renouvelables est négativement significatif, ce qui implique que l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans la consommation totale d'énergie contribue à réduire les émissions de carbone. Mais, l'impact baissier des énergies renouvelables sur les émissions est largement inférieur à l'impact haussier exercé par les énergies fossiles. Il faut donc accélérer le rythme d'installation des énergies renouvelables afin qu'elles puissent provoquer une éviction des énergies fossiles du mix énergétique européen.

De la même manière, les coefficients de la croissance des revenus et de la population sont également positivement significatifs, ce qui signifie que les activités économiques et la croissance de la population provoquent des émissions.

D'après nos résultats empiriques, nous pouvons déduire que la transition vers les énergies renouvelables et l'amélioration de l'efficacité énergétique peuvent rendre réel le rêve d'une émission nette de carbone nulle. Pour atteindre l'objectif de réduction des émissions d'ici 2030, une croissance annuelle de 12 % du déploiement des énergies renouvelables est nécessaire au cours des dix années suivantes. Cette étape est relativement plus difficile à franchir, mais elle facilitera la prochaine phase d'émissions nettes nulles d'ici 2050. Tout retard dans cette transition peut rendre la deuxième phase très difficile et la température peut atteindre un niveau qu'il sera difficile de faire baisser. Comme l'évolution des émissions de carbone n'est pas unitairement élastique par rapport à l'évolution de la croissance des énergies renouvelables, il faut déployer de plus en plus d'énergies propres. Une élimination complète de la consommation de charbon est obligatoire pour atteindre les objectifs. Certains États membres de l'UE ont déjà procédé à une élimination progressive et d'autres sont en train de le faire. Bien que, ces derniers temps, la Chine soit le plus grand consommateur de charbon et que les États-Unis occupent la deuxième place sur la liste, le rôle de ces États, y compris la Russie, l'Inde et le Japon, est également important. Mais, comme la pandémie du Covid-19 pourrait rendre assez difficile de maintenir un flux régulier d’investissements, des mesures politiques, comme le plan de relance de l'UE, sont nécessaires pour ce maintien.

Les recherches futures devraient s’intéresser aux conditions et aux rythmes de déploiement des énergies renouvelables. En outre, la contribution à la réduction des émissions carbone devrait être un défi qui doit être relevé par le monde entier.

Un autre champ de recherche consisterait à explorer les options de financement d'une transition énergétique des énergies fossiles vers les énergies renouvelables en particulier dans les pays moins développés. La transition énergétique aurait coût exorbitant que les économies de ces pays ne sauraient à eux seuls pouvoir supporter.

## References


Acar, Y., Gürdal, T., & Ekeryılmaz, Ş. (2018). Environmental Kuznets Curve for $CO_2$ emissions: An analysis for developing, Middle East, OECD and OPEC countries. Environmental & Socio-economic Studies, 6(4), 48-58.

Adu, D. T., & Denkyirah, E. K. (2018). Economic growth and environmental pollution in West Africa: Testing the Environmental Kuznets Curve hypothesis. Kasetsart Journal of Social Sciences.

Ahmad, N., Du, L., Lu, J., Wang, J., Li, H. Z., & Hashmi, M. Z. (2017). Modelling the $CO_2$ emissions and economic growth in Croatia: is there any environmental Kuznets curve? Energy, 123, 164-172.

Ahmed, K., & Long, W. (2012). Environmental Kuznets curve and Pakistan: an empirical analysis. Procedia Economics and Finance, 1, 4-13.

Ahmed, A., Uddin, G. S., & Sohag, K. (2016). Biomass energy, technological progress and the environmental Kuznets curve: Evidence from selected European countries. Biomass and Bioenergy, 90, 202-208.

Alam, M. M., Murad, M. W., Noman, A. H. M., & Ozturk, I. (2016). Relationships among carbon emissions, economic growth, energy consumption and population growth: Testing Environmental Kuznets Curve hypothesis for Brazil, China, India and Indonesia. Ecological Indicators, 70, 466-479.

Ali, W., Abdullah, A., & Azam, M. (2017). Re-visiting the environmental Kuznets curve hypothesis for Malaysia: fresh evidence from ARDL bounds testing approach. Renewable and sustainable energy reviews, 77, 990-1000.

Al-Mulali, U., Solarin, S. A., & Ozturk, I. (2016a). Investigating the presence of the environmental Kuznets curve (EKC) hypothesis in Kenya: an autoregressive distributed lag (ARDL) approach. Natural Hazards, 80(3), 1729-1747.

Al-Mulali, U., Ozturk, I., & Solarin, S. A. (2016b). Investigating the environmental Kuznets curve hypothesis in seven regions: The role of renewable energy. Ecological indicators, 67, 267-282.

Al-Mulali, U., Saboori, B., & Ozturk, I. (2015). Investigating the environmental Kuznets curve hypothesis in Vietnam. Energy Policy, 76, 123-131.

Alola, A. A., Yalçiner, K., Alola, U. V., & Saint Akadiri, S. (2019). The role of renewable energy, immigration, and real income in environmental sustainability target. Evidence from Europe largest states. Science of The Total Environment, 674, 307-315.

Anwar, A., Siddique, M., Dogan, E., & Sharif, A. (2021). The moderating role of renewable and non-renewable energy in environment-income nexus for ASEAN countries: Evidence from Method of Moments Quantile Regression. Renewable Energy, 164, 956-967.

Apergis, N., & Ozturk, I. (2015). Testing environmental Kuznets curve hypothesis in Asian countries. Ecological Indicators, 52, 16-22.

Ari, I., & Yikmaz, R. F. (2019). The role of renewable energy in achieving Turkey's INDC. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 105, 244-251.

Armeanu, D., Vintilă, G., Andrei, J. V., Gherghina, Ş. C., Drăgoi, M. C., & Teodor, C. (2018). Exploring the link between environmental pollution and economic growth in EU-28 countries: Is there an environmental Kuznets curve? PloS one, 13(5).

Arouri, M. E. H., Youssef, A. B., M'henni, H., & Rault, C. (2012). Energy consumption, economic growth and $CO_2$ emissions in Middle East and North African countries. Energy policy, 45, 342-349.

Asumadu-Sarkodie, S., & Owusu, P. A. (2017). A multivariate analysis of carbon dioxide emissions, electricity consumption, economic growth, financial development, industrialization, and urbanization in Senegal. Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy, 12(1), 77-84.

Aye, GC, & Edoja, PE (2017). Effect of economic growth on $CO_2$ emissions in developing countries: Evidence from a dynamic panel threshold model. Cogent Economics & Finance, 5 (1), 1379239.

Azam, M., & Khan, A. Q. (2016). Testing the Environmental Kuznets Curve hypothesis: A comparative empirical study for low, lower-middle, upper-middle and high-income countries. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 63, 556-567.

Baležentis, T., Streimikiene, D., Zhang, T., & Liobikiene, G. (2019). The role of bioenergy in greenhouse gas emission reduction in EU countries: An Environmental Kuznets Curve modelling. Resources, Conservation and Recycling, 142, 225-231.

Baek, J. (2016). A new look at the FDI–income–energy–environment nexus: dynamic panel data analysis of ASEAN. Energy Policy, 91, 22-27.

Begum, R. A., Sohag, K., Abdullah, S. M. S., & Jaafar, M. (2015). $CO_2$ emissions, energy consumption, economic and population growth in Malaysia. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41, 594-601.

Bekun, F. V., Alola, A. A., & Sarkodie, S. A. (2019). Toward a sustainable environment: Nexus between $CO_2$ emissions, resource rent, renewable and nonrenewable energy in 16-EU countries. Science of the Total Environment, 657, 1023-1029.

Bento, J. P. C., & Moutinho, V. (2016). $CO_2$ emissions, non-renewable and renewable electricity production, economic growth, and international trade in Italy. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 55, 142-155.

Bilgili, F., Koçak, E., & Bulut, Ü. (2016). The dynamic impact of renewable energy consumption on $CO_2$ emissions: a revisited Environmental Kuznets Curve approach. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54, 838-845.

Beşe, E., & Kalayci, S. (2019). Environmental Kuznets Curve (EKC): Empirical Relationship Between Economic Growth, Energy Consumption, and $CO_2$ Emissions: Evidence from 3 Developed Countries. Panoeconomicus, 1-26.

Bölük, G., & Mert, M. (2015). The renewable energy, growth and environmental Kuznets curve in Turkey: An ARDL approach. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 52, 587-595.

Brock, W. A., & Taylor, M. S. (2005). Economic growth and the environment: a review of theory and empirics. In Handbook of economic growth (Vol. 1, pp. 1749-1821). Elsevier.

Cavlovic, T. A., Baker, K. H., Berrens, R. P., & Gawande, K. (2000). A meta-analysis of environmental Kuznets curve studies. Agricultural and Resource Economics Review, 29(1), 32-42.

Cheng, S., & Long, J. S. (2007). Testing for IIA in the multinomial logit model. Sociological methods & research, 35(4), 583-600.

Churchill, S. A., Inekwe, J., Ivanovski, K., & Smyth, R. (2018). The environmental Kuznets curve in the OECD: 1870–2014. Energy Economics, 75, 389-399.

Climact report (2020), "Increasing the eu's 2030 emissions reduction target. June 2020 https://climact.com/wp-content/uploads/2020/06/Climact_Target_Emissions_report_FINAL.pdf

Danish., Zhang, B., Wang, B., & Wang, Z. (2017). Role of renewable energy and non-renewable energy consumption on EKC: evidence from Pakistan. Journal of Cleaner Production, 156, 855-864.

Destek, MA, & Sarkodie, SA (2019). Investigation of environmental Kuznets curve for ecological footprint: the role of energy and financial development. Science of the Total Environment, 650, 2483-2489.

Dietz, T., & Rosa, E. A. (1994). Rethinking the environmental impacts of population, affluence, and technology. Human ecology review, 1(2), 277-300.

Dietz, T., & Rosa, E. A. (1997). Effects of population and affluence on $CO_2$ emissions. Proceedings of the National Academy of Sciences, 94(1), 175-179.

Dinda, S., & Coondoo, D. (2006). Income and emission: a panel data-based cointegration analysis. Ecological Economics, 57(2), 167-181.

Dogan, E., & Seker, F. (2016). Determinants of $CO_2$ emissions in the European Union: The role of renewable and non-renewable energy. Renewable Energy, 94, 429-439.

Dogan, E., & Turkekul, B. (2016). $CO_2$ emissions, real output, energy consumption, trade, urbanization and financial development: testing the EKC hypothesis for the USA. Environmental Science and Pollution Research, 23(2), 1203-1213.

Dong, K., Sun, R., Jiang, H., & Zeng, X. (2018). $CO_2$ emissions, economic growth, and the environmental Kuznets curve in China: What roles can nuclear energy and renewable energy play? Journal of cleaner production, 196, 51-63.

Dumitrescu, E. I., & Hurlin, C. (2012). Testing for Granger non-causality in heterogeneous panels. Economic modelling, 29(4), 1450-1460.

Eberhardt, M., & Bond, S. (2009). Cross-section dependence in nonstationary panel models: a novel estimator.

Ehrlich, P. R., & Holdren, J. P. (1971). Impact of population growth. Science, 171(3977), 1212-1217.

Eren, BM, Taspinar, N., & Gokmenoglu, KK (2019). The impact of financial development and economic growth on renewable energy consumption: Empirical analysis of India. Science of the Total Environment, 663, 189-197.

Esteve, V., & Tamarit, C. (2012). Threshold cointegration and nonlinear adjustment between CO2 and income: the environmental Kuznets curve in Spain, 1857–2007. Energy Economics, 34(6), 2148-2156.

Farhani, S., Mrizak, S., Chaibi, A., & Rault, C. (2014). The environmental Kuznets curve and sustainability: A panel data analysis. Energy Policy, 71, 189-198.

Fodha, M., & Zaghdoud, O. (2010). Economic growth and pollutant emissions in Tunisia: an empirical analysis of the environmental Kuznets curve. Energy Policy, 38(2), 1150-1156.

Greene, W. H. (2003). Econometric analysis. Pearson Education India.

Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991). Environmental impacts of a North American free trade agreement (No. w3914). National Bureau of Economic Research.

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

Hadri, K. (2000). Testing for stationarity in heterogeneous panel data. The Econometrics Journal, 3(2), 148-161. https://doi.org/10.1111/1368-423X.00043

Harbaugh, W. T., Levinson, A., & Wilson, D. M. (2002). Reexamining the empirical evidence for an environmental Kuznets curve. Review of Economics and Statistics, 84(3), 541-551.

Harrison, P., & Pearce, F. (2000). AAAS atlas of population & environment. Univ of California Press.

Hausman, J., & McFadden, D. (1984). Specification tests for the multinomial logit model. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1219-1240.

He, Y., & Lin, B. (2019). Investigating environmental Kuznets curve from an energy intensity perspective: empirical evidence from China. Journal of Cleaner Production, 234, 1013-1022.

Heidari, H., Katircioğlu, S. T., & Saeidpour, L. (2015). Economic growth, $CO_2$ emissions, and energy consumption in the five ASEAN countries. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 64, 785-791.

Holdren, J. P., & Ehrlich, P. R. (1974). Human Population and the Global Environment: Population growth, rising per capita material consumption, and disruptive technologies have made civilization a global ecological force. American scientist, 62(3), 282-292.

Hosmer Jr, D. W., Lemeshow, S., & Sturdivant, R. X. (2013). Applied logistic regression (Vol. 398). John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-470-58247-3

Hove, S., & Tursoy, T. (2019). An investigation of the environmental Kuznets curve in emerging economies. Journal of Cleaner Production, 236, 117628.

IEA (2021). Net Zero by 2050-A Roadmap for the Global Energy Sector. https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050

IRENA (2020), Reaching zero with renewables: Eliminating $CO_2$ emissions from industry and transport in line with the $1.5^0$C climate goal, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ISBN 978-92-9260-269-7

IRENA (2021), Renewable capacity statistics 2021 International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi. ISBN 978-92-9260-342-7

Işık, C., Ongan, S., & Özdemir, D. (2019). Testing the EKC hypothesis for ten US states: an application of heterogeneous panel estimation method. Environmental Science and Pollution Research, 26(11), 10846-10853.

Iwata, H., Okada, K., & Samreth, S. (2010). Empirical study on the environmental Kuznets curve for $CO_2$ in France: the role of nuclear energy. Energy Policy, 38(8), 4057-4063.

Jalil, A., & Mahmud, S. F. (2009). Environment Kuznets curve for $CO_2$ emissions: a cointegration analysis for China. Energy policy, 37(12), 5167-5172.

Jebli, M. B., & Youssef, S. B. (2015). The environmental Kuznets curve, economic growth, renewable and non-renewable energy, and trade in Tunisia. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 47, 173-185

Jebli, M. B., Youssef, S. B., & 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, 824-831.

Kang, Y. Q., Zhao, T., & Yang, Y. Y. (2016). Environmental Kuznets curve for CO2 emissions in China: A spatial panel data approach. Ecological Indicators, 63, 231-239.

Kaufman, N., Barron, A. R., Krawczyk, W., Marsters, P., & McJeon, H. (2020). A near-term to net zero alternative to the social cost of carbon for setting carbon prices. Nature Climate Change, 10(11), 1010-1014.

Khan, I., Saqib, M., & Hafidi, H. (2019). Poverty and environmental nexus in rural Pakistan: a multidimensional approach. GeoJournal, 1-15.

Kuznets, S. (1955). Economic growth and income inequality. The American economic review, 45(1), 1-28.

Lau, L. S., Choong, C. K., & Eng, Y. K. (2014). Investigation of the environmental Kuznets curve for carbon emissions in Malaysia: do foreign direct investment and trade matter? Energy Policy, 68, 490-497.

Lau, L. S., Choong, C. K., Ng, C. F., Liew, F. M., & Ching, S. L. (2019). Is nuclear energy clean? Revisit of Environmental Kuznets Curve hypothesis in OECD countries. Economic Modelling, 77, 12-20.

Li, H., Grijalva, T., & Berrens, R. P. (2007). Economic growth and environmental quality: a meta-analysis of environmental Kuznets curve studies. Economics Bulletin, 17(5), 1-11.

Li, T., Wang, Y., & Zhao, D. (2016). Environmental Kuznets curve in China: new evidence from dynamic panel analysis. Energy Policy, 91, 138-147.

Liobikienė, G., & Butkus, M. (2017). Environmental Kuznets Curve of greenhouse gas emissions including technological progress and substitution effects. Energy, 135, 237-248.

Liu, X., Zhang, S., & Bae, J. (2017). The impact of renewable energy and agriculture on carbon dioxide emissions: investigating the environmental Kuznets curve in four selected ASEAN countries. Journal of Cleaner Production, 164, 1239-1247.

Liu, J., Qu, J., & Zhao, K. (2019). Is China's development confirming to the Environmental Kuznets Curve hypothesis and the pollution haven hypothesis? Journal of Cleaner Production, 234, 787-796.

Long, J.S., & Freese, J. (2001). Regression models for categorical dependent variables using Stata, 2nd Edition, Stata Press.

Lucas, R. E., Wheeler, D., & Hettige, H. (1992). Economic development, environmental regulation, and the international migration of toxic industrial pollution, 1960-88 (Vol. 1062). World Bank Publications.

Maddala, G. S., & Wu, S. (1999). A comparative study of unit root tests with panel data and a new simple test. Oxford Bulletin of Economics and statistics, 61(S1), 631-652.

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. Annals of internal medicine, 151(4), 264-269.

Moutinho, V., Moreira, A. C., & Silva, P. M. (2015). The driving forces of change in energy-related $CO_2$ emissions in Eastern, Western, Northern and Southern Europe: The LMDI approach to decomposition analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 50, 1485-1499.

Moutinho, V., Varum, C., & Madaleno, M. (2017). How economic growth affects emissions? An investigation of the environmental Kuznets curve in Portuguese and Spanish economic activity sectors. Energy Policy, 106, 326-344.

Mrabet, Z., & Alsamara, M. (2017). Testing the Kuznets Curve hypothesis for Qatar: A comparison between carbon dioxide and ecological footprint. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 70, 1366-1375.

Murshed, M. (2020). Are Trade Liberalization policies aligned with Renewable Energy Transition in low- and middle-income countries? An Instrumental Variable approaches. Renewable Energy, 151, 1110-1123.

Norton EC, Dowd BE, Maciejewski ML. (2019). Marginal Effects Quantifying the Effect of Changes in Risk Factors in Logistic Regression
Models. JAMA. 321(13):1304–1305.

Omri, A., Daly, S., Rault, C., & Chaibi, A. (2015). Financial development, environmental quality, trade and economic growth: What causes what in MENA countries. Energy Economics, 48, 242-252.

Ozturk, I., & Al-Mulali, U. (2015). Investigating the validity of the environmental Kuznets curve hypothesis in Cambodia. Ecological Indicators, 57, 324-330.

Panayotou, T. (1993). Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development (No. 992927783402676). International Labour Organization.

Panayotou, T. (1997). Demystifying the environmental Kuznets curve: turning a black box into a policy tool. Environment and development economics, 2(4), 465-484.

Pao, H. T., & Tsai, C. M. (2010). CO2 emissions, energy consumption and economic growth in BRIC countries. Energy policy, 38(12), 7850-7860.

Pao, H. T., Yu, H. C., & Yang, Y. H. (2011). Modeling the $CO_2$ emissions, energy use, and economic growth in Russia. Energy, 36(8), 5094-5100.

Pata, U. K. (2018). Renewable energy consumption, urbanization, financial development, income and $CO_2$ emissions in Turkey: testing EKC hypothesis with structural breaks. Journal of Cleaner Production, 187, 770-779.

Pedroni, P. (1999). Critical values for cointegration tests in heterogeneous panels with multiple regressors. Oxford Bulletin of Economics and statistics, 61(S1), 653-670.

Pedroni, P. (2004). Panel cointegration: asymptotic and finite samples of pooled time series tests with an application to the PPP hypothesis. Econometric theory, 20 (3), 597-625.

Percebois, J. (2014). Les mécanismes de soutien aux énergies renouvelables, leurs forces et leurs faiblesses respectives. Cahier de recherche n, 14, 107.

Pesaran, M. H. (2004). General diagnostic tests for cross section dependence in panels. CESifo Working Paper Series 1229. CESifo Group Munich.

Pesaran, MH (2007). A simple panel unit root test in the presence of cross-section dependence. Journal of Applied Econometrics, 22 (2), 265-312.

Raskin, P. D. (1995). Methods for estimating the population contribution to environmental change. Ecological economics, 15(3), 225-233.

Rasoulinezhad, E., & Saboori, B. (2018). Panel estimation for renewable and non-renewable energy consumption, economic growth, $CO_2$ emissions, the composite trade

intensity, and financial openness of the commonwealth of independent states. Environmental Science and Pollution Research, 25 (18), 17354-17370.

Ridzuan, S. (2019). Inequality and the environmental Kuznets curve. Journal of cleaner production, 228, 1472-1481.

Saboori, B., Sulaiman, J., & Mohd, S. (2012). Economic growth and $CO_2$ emissions in Malaysia: a cointegration analysis of the environmental Kuznets curve. Energy policy, 51, 184-191.

Saqib, M., & Benhmad, F. (2021a). Updated meta-analysis of environmental Kuznets curve: Where do we stand? Environmental Impact Assessment Review, 86, 106503.

Saqib, M., & Benhmad, F. (2021b). Does ecological footprint matter for the shape of the environmental Kuznets curve? Evidence from European countries. Environmental Science and Pollution Research, 28(11), 13634-13648.

Sarkar, M. S. K., Sadeka, S., & Sikdar, M. M. H. (2018). Energy consumption and $CO_2$ emission in Bangladesh: trends and policy implications. Asia Pacific Journal of Energy and Environment, 5(1), 41-48.

Sarkodie, S. A., & Strezov, V. (2018). Empirical study of the environmental Kuznets curve and environmental sustainability curve hypothesis for Australia, China, Ghana and USA. Journal of cleaner production, 201, 98-110.

Sarkodie, S. A., & Strezov, V. (2019). A review on environmental Kuznets curve hypothesis using bibliometric and meta-analysis. Science of the total environment, 649, 128-145.

Sebri, M. (2015). Use renewables to be cleaner: meta-analysis of the renewable energy consumption–economic growth nexus. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 42, 657-665.

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.

Selden, T. M., Forrest, A. S., & Lockhart, J. E. (1999). Analyzing the reductions in US air pollution emissions: 1970 to 1990. Land Economics, 1-21.

Shafik, N. (1994). Economic development and environmental quality: an econometric analysis. Oxford economic papers, 46(4), 757-774.

Shafiei, S., & Salim, RA (2014). Non-renewable and renewable energy consumption and $CO_2$ emissions in OECD countries: A comparative analysis. Energy Policy, 66, 547-556.

Shahbaz, M., Lean, H. H., & Shabbir, M. S. (2012). Environmental Kuznets curve hypothesis in Pakistan: cointegration and Granger causality. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(5), 2947-2953.

Shahbaz, M., Mutascu, M., & Azim, P. (2013). Environmental Kuznets curve in Romania and the role of energy consumption. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 18, 165-173.

Sharif, A., Raza, S. A., Ozturk, I., & Afshan, S. (2019). The dynamic relationship of renewable and nonrenewable energy consumption with carbon emission: a global study with the application of heterogeneous panel estimations. Renewable Energy, 133, 685-691.

Siddi, M. (2020). The European Green Deal: Assessing its current state and future implementation.

Song, T., Zheng, T., & Lianjun, T. (2008). An empirical test of the environmental Kuznets curve in China: a panel cointegration approach. China Economic Review, 19(3), 381-392.

Stern, D. I. (2003). International society for ecological economics internet encyclopedia of ecological economics the environmental Kuznets curve. Department of Economics, Rensselaer Polytechnic Institute.

Stern, D. I. (2010). Between estimates of the emissions-income elasticity. Ecological Economics, 69 (11), 2173-2182.

Stern, P. C., Young, O. R., & Druckman, D. E. (1992). Global environmental change: Understanding the human dimensions. National Academy Press.

Tamazian, A., Chousa, J. P., & Vadlamannati, K. C. (2009). Does higher economic and financial development lead to environmental degradation: evidence from BRIC countries. Energy policy, 37(1), 246-253.

Tamazian, A., & Rao, B. B. (2010). Do economic, financial and institutional developments matter for environmental degradation? Evidence from transitional economies. Energy Economics, 32(1), 137-145.

Thompson, S. G., & Higgins, J. P. (2002). How should meta-regression analyses be undertaken and interpreted? Statistics in medicine, 21(11), 1559-1573.

Tiwari, A. K., Shahbaz, M., & Hye, Q. M. A. (2013). The environmental Kuznets curve and the role of coal consumption in India: cointegration and causality analysis in an open economy. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 18, 519-527.

UNIDO (2020). The European Green Deal. Europe's new growth strategy, a climate neutral EU by 2050.

Vijverberg, W. P. (2011). Testing for IIA with the Hausman-McFadden test. Available at SSRN 1882845.

Vincent, J. R. (1997). Testing for environmental Kuznets curves within a developing country. Environment and development economics, 2(4), 417-431.

Wackernagel, M., & Rees, W. (1998). Our ecological footprint: reducing human impact on the earth (Vol. 9). New Society Publishers.

Waggoner, P. E., & Ausubel, J. H. (2002). A framework for sustainability science: A renovated IPAT identity. Proceedings of the National Academy of Sciences, 99(12), 7860-7865.

Wagner, M. (2008). The carbon Kuznets curve: a cloudy picture emitted by bad econometrics? Resource and Energy Economics, 30(3), 388-408.

Wang, Y., Zhang, C., Lu, A., Li, L., He, Y., ToJo, J., & Zhu, X. (2017). A disaggregated analysis of the environmental Kuznets curve for industrial $CO_2$ emissions in China. Applied Energy, 190, 172-180.

Wang, Z., Bu, C., Li, H., & Wei, W. (2019). Seawater environmental Kuznets curve: evidence from seawater quality in China's coastal waters. Journal of Cleaner Production, 219, 925-935.

Westerlund, J. (2007). Testing for error correction in panel data. Oxford Bulletin of Economics and statistics, 69(6), 709-748.

York, R., Rosa, E. A., & Dietz, T. (2002). Bridging environmental science with environmental policy: Plasticity of population, affluence, and technology. Social Science Quarterly, 83(1), 18-34.

York, R., Rosa, E. A., & Dietz, T. (2003). STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. Ecological economics, 46(3), 351-365.

Zambrano-Monserrate, M. A., Silva-Zambrano, C. A., Davalos-Penafiel, J. L., Zambrano-Monserrate, A., & Ruano, M. A. (2018). Testing environmental Kuznets curve hypothesis in Peru: The role of renewable electricity, petroleum and dry natural gas. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 4170-4178.

Zhu, H., Duan, L., Guo, Y., & Yu, K. (2016). The effects of FDI, economic growth and energy consumption on carbon emissions in ASEAN-5: evidence from panel quantile regression. Economic Modelling, 58, 237-248.

# List des Figures


- **Introduction Générale**

0.1 Courbe environnementale de Kuznets 03

- **Chapitre 1**

1.1 Preferred Reporting Items for Meta Regression Analysis (PRIMRA) 19

1.2 Répartition annuelle des études et des observations 21

1.3 Distribution par catégorie de toutes les observations 24

1.4 Répartition des catégories par année 25

1.5 Tracé ajusté du modèle estimé pour toutes les catégories 46

- **Chapitre 2**

2.1 Tracé des séries temporelles des variables 70

- **Chapitre 3**

3.1 Présentation du Pacte vert européen 96

3.2 Énergie fossile et émissions de $CO_2$ dans l'UE 99

3.3 Énergies renouvelables et émissions de $CO_2$ dans l'UE 99

3.4 Transition énergétique en Europe 100

3.5 Capacité électrique nette pour les énergies renouvelables dans l'UE-27 101

3.6 Evolution de Production d'électricité du charbon 102

3.7 Graphique de séries temporelles de variables (Panneaux A à E) 107-110

3.8 Emission de carbone par habitant (MMTOE) 127

3.9 Variation en $CO_2$ vs Variation en RE 128

3.10 Consommation d'énergie et efficacité énergétique 130

# Liste des Tableaux

- **Chapitre 1**


1.1 Variables et statistiques descriptives 22
1.2 Résultats du test du rapport de vraisemblance 35
1.3 Résultats de la régression Logit multinomiale et rapports de risque relatif 37
1.4 Résultats du test de Wald 41
1.5 Effets Marginaux Moyens 44
1.6 Résultats du test de Hausman et McFadden 47


- **Chapitre 2**


2.1 Revue de la littérature 60
2.2 Statistique Descriptives 69
2.3 Résultat du test de Pesaran (2004) 73
2.4 Les résultats des tests de CIPS et CADF 78
2.5 Les résultats des tests Pedroni and Kao 79
2.6 Les résultats de PMG et AMG 80
2.7 Les résultats spécifiques par pays 83
2.8 Les résultats de DOLS et FMOLS 85
2.9 Dumitrescu-Hurlin Panel Causality Test results 87


- **Chapitre 3**


3.1 Statistiques descriptives 110
3.2 Test de dépendance transversale de Pesaran (2004) 113
3.3 Le test de racine unitaire 114
3.4 Résultats de test de Hausman 120
3.5 Résultats de la régression PMG/ARDL 121
3.6 L'analyse à court terme spécifique à chaque pays 124

# Table des Matières

**Introduction Générale** 01

**Chapitre 1 : Une méta-analyse de la courbe de Kuznets environnementale**

1. Introduction 14
2. Analyse de méta régression 17
3. Preferred Reporting Items for Meta Regression Analysis (PRIMRA) 18
   - 3.1. Identifier la littérature 20
   - 3.2. Determiner les variables 21
   - 3.3. Identifier les observations individuelles 27
   - 3.4. Codage et extraction des données 28
   - 3.5. Méthode d'estimation et d'exécution 30
     - 3.5.1. Test de Wald 32
     - 3.5.2. Test du rapport de vraisemblance (LR) 33
     - 3.5.3. Test de Hausman (test de IIA) 34
4. Résultats empiriques et discussion 35
   - 4.1. Test du rapport de vraisemblance (LR) 35
   - 4.2. Estimations de la régression Logit Multinomiale 36
   - 4.3. Le test de Wald 41
   - 4.4. Effets Marginaux moyens 42
   - 4.5. Test d'indépendance des alternatives non pertinentes (IIA) 46
5. Conclusion et implications politiques 47

Annexe 1 52

**Chapitre 2 : L'analyse empirique de la courbe de Kuznets : Cas des pays Européennes**

1. Introduction 54
2. Revue de la littérature 59
3. Le Modèle 66
4. Données et méthodologie d'estimation 68
   - 4.1. Description des données 68
   - 4.2. Dépendance Transversale 72
   - 4.3. Test de racine unitaire en panel 74
   - 4.4. Cointégration en panel 74

4.5. Paramètre de long terme 75
4.6. Test de causalité 76
5. Les résultats empiriques 78
5.1. Test de racine unitaire 78
5.2. Cointégration en panel 79
5.3. Paramètre de long terme 80
5.4. Analyse de Robustesse 85
5.5. Analyse de causalité 86
6. Conclusion 88

**Chapitre 3 : Le rôle des énergies renouvelables dans la neutralité carbone : Cas des pays Européens**

1. Introduction 91
2. Transition énergétique en Europe 97
3. Le modèle 103
4. Données 106
5. Méthodologie 111
5.1. Test de racine unitaire 111
5.2. Estimation de Long terme 115
5.2.1. Estimations moyennes groupées des groupes (PMG) 116
6. Discussion et implication politiques 126
7. Conclusion 132

Annexes 3 136

**Conclusion Générale** 151

Références 159