

Impact du revenu et de la consommation de l'énergie sur les émissions de CO₂ au Maroc : Test de la courbe environnementale de Kuznets

Impact of income and energy consumption on CO₂ emissions in Morocco: A test of the environmental Kuznets curve

Auteur 1 : MOUSSANE Aboutayeb

Auteur 2 : ELAZZOUZI Mohamed

Auteur 3 : TARBALOUTI Essaid,

Auteur 4 : OUALI Abderrazak,

MOUSSANE Aboutayeb, (Doctorant)

Université Cadi Ayyad/ Faculté des sciences juridiques, économiques et sociales Marrakech
Laboratoire de recherche en économie de l'énergie, environnement et ressources

ELAZZOUZI Mohamed, (Doctorant)

Université Mohammed V- Rabat/ Faculté des sciences juridiques, économiques et sociales- Agdal
Laboratoire d'Economie Appliquée, Département des Sciences économiques

TARBALOUTI Essaid, (PES, enseignant-chercheur)

Université Cadi Ayyad/ Faculté des sciences juridiques, économiques et sociales Marrakech
Laboratoire de recherche en économie de l'énergie, environnement et ressources

OUALI Abderrazak (Enseignant-chercheur)

Université Cadi Ayyad/ Faculté des sciences juridiques, économiques et sociales Marrakech
Laboratoire de recherche en économie de l'énergie, environnement et ressources

Déclaration de divulgation : L'auteur n'a pas connaissance de quelconque financement qui pourrait affecter l'objectivité de cette étude.

Conflit d'intérêts : L'auteur ne signale aucun conflit d'intérêts.

Pour citer cet article : MOUSSANE .A , ELAZZOUZI .M , TARBALOUTI .E & OUALI .A (2022)

« Impact du revenu et de la consommation de l'énergie sur les émissions de CO₂ au Maroc : Test de la courbe environnementale de Kuznets », African Scientific Journal « Volume 03, Numéro 15 » pp: 301 - 323.

Date de soumission : Novembre 2022

Date de publication : Décembre 2022



DOI : 10.5281/zenodo.7520861
Copyright © 2022 – ASJ



Résumé :

Ce travail utilise le test ARDL pour évaluer empiriquement la validité de la courbe de Kuznets environnementale. Notre étude cherche à déterminer l'existence d'un lien à long terme entre les émissions de CO₂ la croissance économique et la consommation énergétique.

Les tests de cointégration de Johansen démontrent qu'une relation robuste à long terme existe entre les variables. Plus précisément, le PIB influe positivement sur les émissions de dioxyde de carbone, tandis que le carré du PIB influe négativement et l'énergie consommée ont un impact positive. Les tests de causalité de Granger indiquent en outre que le PIB et le PIB² ont provoqué les émissions de CO₂ de manière unidirectionnelle à court terme, sans rétroaction.

Les résultats soutiennent généralement l'existence d'une relation en U inversé entre la croissance économique et les émissions de carbone et une relation linéaire entre le CO₂ et la consommation énergétique.

L'existence d'une courbe de Kuznets à long terme est le résultat de différentes politiques environnementales nationales, cependant l'impact de l'énergie reste relativement important suite à la dépendance énergétique liée aux énergies fossiles. L'installation des différents projets d'énergies renouvelables à travers le pays à savoir les éoliennes et les panneaux solaires s'inscrivent dans cette tendance de réduction de la dépendance et de la pollution engendrée par l'usage du charbon. Les conclusions de l'étude corroborent la courbe de Kuznets environnementale pour le Maroc entre 1980 et 2018.

Mots clés : CKE, émissions de CO₂, ARDL, Maroc

Abstract:

This paper uses the ARDL test to empirically assess the validity of the environmental Kuznets curve. Our study investigates the existence of a long-run relationship between CO₂ emissions, economic growth and energy consumption. Johansen cointegration tests show that a robust long-run relationship exists between the variables. Specifically, GDP has a positive effect on carbon dioxide emissions, while GDP squared has a negative effect, and energy consumption has a positive impact. Granger causality tests also indicate that GDP and GDP squared caused CO₂ emissions unidirectionally in the short run. The results generally support the existence of an inverted U-shaped relationship between economic growth and carbon emissions and a linear relationship between CO₂ and energy consumption.

The existence of a long-term environmental Kuznets curve is the result of various national environmental policies, but the impact of energy is still relatively important due to the energy dependence on fossil fuels. The implementation of various renewable energy projects across the country, such as wind turbines and solar panels, is part of this trend of reducing dependence and pollution caused by the use of coal. The study's findings confirm the environmental Kuznets curve for Morocco between 1980 and 2018.

Keywords: EKC, CO₂ emissions, ARDL, Morocco

1. Introduction

Si on projette la théorie avancée par les limites de la croissance sur un plan cartésien, elle nous donnera une droite affine où la croissance est en abscisse et la dégradation de l'environnement est en ordonnée. La théorie de la courbe de Kuznets environnemental (CKE) ne s'inscrit pas dans cette démarche, puisqu'elle nous dit que la croissance et la dégradation suivent une tendance en courbe de forme U inversée. La pollution atteint son paroxysme pendant le début du développement, mais une fois le développement atteint un point élevé, la courbe inverse la tendance et devient baissière. Plusieurs explications viennent adosser la théorie de la CKE, par exemple la hausse des revenus par habitant ou encore le développement technologique qui permet de lutter contre la pollution. La théorie de la CKE part d'une idée simple entre deux variables, la première est une variable de dégradation, le deuxième est la croissance économique. Si on s'intéresse aux détails de la nature de la dégradation de l'environnement, nous nous retrouvons avec un problème de mesure de la dégradation, pour déterminer le type de la relation entre croissance et détérioration de l'environnement. La majorité des études sur la CKE porte sur des variables qui sont mesurables comme les GES. Cette commensurabilité de la variable de dégradation montre la difficulté du sujet (Vogel, 1999).

La courbe de Kuznets s'inscrit dans une liste des différentes théories économiques qui critiquent les visions Malthusiennes et du club de Rome. Le développement durable par exemple vient concilier les différentes sphères du développement social et environnemental et économique, on parle d'une croissance soutenable. Il n'est pas nécessaire de suivre l'itinéraire des pays développés basé sur la consommation accrue de l'actif naturel si les composantes de la croissance ne sont pas polluantes. La courbe de Kuznets décrit une relation de forme U inversé entre la croissance économique et la dégradation de l'environnement, inspiré de la courbe de Kuznets des inégalités sociale. La théorie nous montre que lors des premières phases du développement économique, la dégradation de l'environnement atteint son paroxysme suite à la prépondérance de l'effet d'échelle. On atteignant un niveau de développement élevé la courbe arrive à son point d'inflexion où la dégradation environnementale et la croissance économique suivent une tendance négative, suite aux effets technologiques et de compositions qui surplombent les effets d'échelles (Grossman et Krueger, 1991). La CKE nous montre que la dégradation de l'environnement est qu'une étape du développement économique et non une conséquence. Comme le soulignent Arrow et al. (1996), l'amélioration de la qualité de l'environnement peut être observée à travers la croissance du PIB, mais cette corrélation ne peut pas être considérée comme une solution acquise pour tous les problèmes environnementaux qui, dans de nombreux cas, sont représentés comme des stocks accumulés

sur une longue période. Malgré le grand nombre d'études qui soutiennent une décroissance de la pollution à un certain niveau de développement, il existe néanmoins des études qui confirment le contraire. Khanna et Plassmann (2004) notent qu'il existe une tendance positive entre le développement des économies et la pollution engendrée. Uchiyama (2016) souligne l'absence de réglementation dans le cas du CO₂ : « Le CKE concernant la qualité de l'air est observé lorsque la zone de pollution est locale, et que le polluant est de type fluide qui se décompose en un temps relativement court, et que certaines réglementations ont déjà été introduites. Lorsque, comme c'est le cas pour le CO₂, le polluant est de type stock et que peu de réglementations ont été introduites, l'existence de CKE reste controversée ». En conséquence, il suggère l'existence de deux cas pour la CKE, en ce qui concerne les émissions de CO₂ : « un avec une courbe en U inversé et un autre avec une fonction monotone et croissant ».

Afin de profiter de l'avantage naturel dans dispose le pays, le Maroc met un dispositif réglementaire visant à atténuer les effets des polluants, y compris les émissions de CO₂, concernant les énergies renouvelables pour attirer les investisseurs privés. Cet arsenal réglementaire s'est matérialisé par l'adoption de la loi 13-09 concernant les énergies renouvelables, qui est publié dans le bulletin officiel de 2010. En effet, le Maroc a choisi de suivre un mode de production sobre en carbone, via la signature de plusieurs traités internationaux. Pour concrétiser cette vision sur le terrain, le royaume a commencé par l'installation de plusieurs parcs éoliens. Mais aussi il s'est fortement intéressé à l'usage de l'énergie solaire, puisque le pays se situe sur l'équateur et par conséquent il a un fort potentiel de rendement concernant l'énergie solaire. Un des projets solaires les plus marquants réalisés est la station solaire Noor Ouarzazate IV, qui est située dans la ville qui porte son nom Ouarzazate. La station est de type photovoltaïque, avec un système de tracking qui lui permet d'optimiser la production d'électricité. Le projet a coûté à l'État 775 Millions de DH, et la mise en service était pour 2018. Selon le rapport du Ministère de l'Énergie (2020), la station permet d'éviter des émissions de CO₂ équivalentes à 86 539 T CO₂ /ans.

Il existe un nombre important de recherches dans le domaine de la CKE qui utilisent des approches de données de panel entre pays pour se concentrer sur la performance globale. Bien qu'il soit crucial de tester et de surveiller la pollution à l'échelle mondiale, la mesure des performances individuelles est également important, que ce soit pour les polluants locaux ou mondiaux. Tester la validité de la CKE pour le Maroc donne des indices sur la corrélation entre la croissance du PIB et le CO₂, et les résultats aident à mettre en évidence une future trajectoire

des politiques publiques. En tant que pays en développement, la situation du Maroc est en accord avec cette idée.

L'objectif principal de ce papier porte sur le test de la validité de la courbe environnementale de Kuznets. En particulier, il examine l'impact du revenu et de la consommation de l'énergie sur les émissions de CO₂. La question qui nous interpellera tout au long de cet article est d'examiner une relation de causalité entre les émissions de CO₂ (comme une variable de dégradation), le revenu par habitant et l'énergie. Si elle existe, et est-ce qu'elle suit une courbe en U inversée comme le suggère la théorie de la courbe de Kuznets environnementale ou une autre forme. L'objectif de cette étude est de tester la validité de cette relation non linéaire de forme U inversée au Maroc, en utilisant une estimation d'un modèle autorégressif à retard distribué (ARDL). Pour ce faire, nous avons utilisé des données annuelles sur la période allant de 1980 à 2018. Belloumi (2009) a appliqué l'approche de l'ARDL pour détecter la relation causale entre les variables. En cas de petite taille d'échantillon, l'approche ARDL est plus préférable à la méthode de cointégration de Johansen.

Le reste du travail est organisé comme suit. Tout d'abord, dans la deuxième section une revue de la littérature présente les études concernant d'autres pays. Ensuite, dans la troisième section nous allons présenter le modèle et la méthodologie. Ensuite, Dans la quatrième section, nous allons interpréter des résultats empiriques. Enfin, dans la cinquième section les résultats obtenus et leurs implications politiques sont présentés.

2. Revue de littérature

Cette section est une présentation des différents travaux empiriques sur la CKE. Cette section comprendra les différentes études ayant été faites sur les pays développés et des pays en voie de développement. L'objectif de ces travaux empiriques est de ressortir les spécificités de la CKE des pays développés et des pays en voie de développement. Nous aurons l'occasion également, de présenter les différentes méthodes économétriques ayant été utilisées pour tester la validité de la CKE, et les différents choix de variables afin de voir les différentes applications possibles de CKE.

Il existe une grande littérature empirique concernant l'investigation de l'existence de CKE dans différent pays ou panel de pays dans le monde. Cette littérature montre l'intérêt que portent les économistes sur la CKE, puisqu'elle permet de savoir si la pollution d'une manière générale est le résultat de la croissance économique ou une phase du développement économique d'un pays. Une étude réalisée par Ahmad et al. (2017) sur la validité de la CKE dans la Croatie pour la période allant de 1992 à 2011, c'est penchés sur les émissions du CO₂ comme variable de dégradation environnementale, en estimant un modèle ARDL. Les résultats démontrent

l'existence de la CKE dans le long terme et son inexistence dans le court terme. Dans l'économie de l'énergie, il est clair qu'il existe une vaste littérature sur le lien entre le revenu, la consommation d'énergie et les émissions. Cependant, les résultats des études empiriques varient d'une étude à l'autre en fonction des spécificités de chaque pays. Sari et Soytas (2007) ont utilisé des données annuelles de 1971 à 2002 pour examiner le lien intertemporel entre la consommation d'énergie et le revenu dans six pays en développement (Indonésie, Iran, Malaisie, Pakistan, Singapour et Tunisie) estimant une fonction de production. Ils ont trouvé que la croissance du revenu et la consommation d'énergie contiennent des informations considérables en appliquant les décompositions de la variance généralisée et la réponse impulsionnelle généralisée.

Kanjilal et Ghosh (2013) testent l'existence de la CKE en Inde pour la période allant de 1971 à 2008. Pour la validation de la relation en forme U inversé, les auteurs ont opté pour la cointégration entre le CO₂, l'énergie et l'ouverture du commerce. En utilisant un modèle ARDL les résultats démontrent qu'il n'existe pas de relation entre le CO₂, et les autres variables quand le CO₂ est la variable dépendante. Cependant avec le test du seuil de cointégration, ce dernier démontre qu'il existe une relation de long terme entre le CO₂ et les autres variables. L'estimation du modèle démontre l'existence de la CKE en Inde. Germani et al. (2020), se sont intéressés à l'existence de la relation entre le revenu et le crime organisé. Cette étude essaye de tester une CKCE (Courbe de Kuznet du crime environnemental), c'est-à-dire si la relation entre crime écologique et le revenu suit une évolution du type U inversé comme celle que suit la CKE. Pour la robustesse du modèle, il a été estimé deux fois : la première avec le PIB par habitant et la deuxième avec les revenus des ménages. Les résultats démontrent une très grande significativité en faveur de l'existence d'une CKCE, en Italie avec un point de retournement estimé à 22491 et 25554 euros, c'est-à-dire que la diminution de la pollution n'intervient qu'après avoir atteint ces revenus. En d'autres termes, les résultats montrent que l'augmentation des revenus diminue les crimes environnementaux. Une des interprétations retenues est que les régions qui ont plus de revenus sont plus enclines à se conformer à la justice que les régions les plus pauvres.

Bello et al. (2018) ont testé l'hypothèse CKE et les relations causales entre les indicateurs de pollution environnementale, l'empreinte écologique, l'urbanisation et la consommation d'énergie hydroélectrique de 1971 à 2016. Dans cette étude, l'empreinte carbone, les émissions de CO₂, la croissance économique et l'empreinte eau ont été utilisées comme indicateurs de pollution environnementale. Les auteurs ont identifié une causalité unidirectionnelle de la consommation d'énergie hydroélectrique à tous les indicateurs de pollution environnementale

et à la croissance économique. Ils ont également trouvé une causalité bidirectionnelle entre la croissance économique et les indicateurs. L'étude a conclu que la consommation d'énergie hydroélectrique diminue la pollution environnementale et que la CKE est valide en Malaisie. Destek et al. (2018) ont examiné la relation entre la consommation d'énergie fossile, l'ouverture commerciale, la croissance économique, les tests de consommation d'énergie renouvelable et l'empreinte écologique pour les 15 pays de l'UE pendant la période 1980-2013. Ils ont confirmé la validité de CKE et ont constaté que la consommation d'énergie renouvelable réduit l'empreinte écologique. Destek et Sinha (2020) ont utilisé divers estimateurs de données de panel et des tests de cointégration sur la période 1980-2014. Ils ont soutenu que l'hypothèse de CKE n'est pas valide dans 24 pays de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) et ont conclu que la consommation d'énergie renouvelable diminue l'empreinte écologique. En outre, une étude récente a examiné de manière empirique la validité de la courbe de Kuznets environnementale en utilisant des données sur les émissions de gaz à effet de serre dans un échantillon de pays de l'OCDE. Selon cette étude (Kim et al., 2020), les résultats ont montré que la courbe de Kuznets environnementale est valide dans cet échantillon de pays de l'OCDE, avec une diminution significative des émissions de gaz à effet de serre à mesure que le niveau de développement économique augmente.

Ulucak et Khan (2020) ont effectué une analyse de données de panel couvrant la période 1992-2016. Ils ont constaté que la consommation d'énergie renouvelable réduit l'empreinte écologique et que l'hypothèse CKE est valide pour le Brésil, la Chine, l'Inde, la Russie et l'Afrique du Sud. En outre, il n'existe qu'un nombre limité d'études qui testent le lien de causalité entre les émissions de CO₂, de la consommation d'énergie et la croissance économique (Bildirici et Gökmenoğlu, 2017). Lee et al. (2019) ont examiné l'impact de différents facteurs, tels que le niveau de développement économique, les politiques environnementales et les technologies utilisées, sur les émissions de gaz à effet de serre dans un échantillon de pays de l'OCDE et de pays en développement. Les résultats de l'étude ont montré que le niveau de développement économique était un facteur important influençant les émissions de gaz à effet de serre, mais que d'autres facteurs tels que les politiques environnementales et les technologies utilisées avaient également une influence significative. L'étude a également constaté que la courbe de Kuznets environnementale n'était pas valide dans tous les pays de l'échantillon et que la relation entre le niveau de développement économique et les émissions de gaz à effet de serre variait selon le pays. Akca (2021), a également évalué empiriquement l'existence d'une relation entre la croissance économique et le développement financier sur les émissions du CO₂ en Turquie pour la période allant de 1965

à 2018. L'auteur a estimé un modèle en utilisant un modèle ARDL avec le test de causalité Fourier Toda-Yamamoto. Les résultats démontrent une relation de type U-inversé entre les émissions de CO₂ en Turquie et la croissance économique et l'absence d'une relation entre le développement financier et les émissions de CO₂.

On peut clairement voir que l'hypothèse CKE est confirmée dans la plupart des études qui testent les effets de la consommation d'énergie sur les émissions de CO₂. Toutefois, il convient de noter que la validité de la courbe de Kuznets n'a pas été confirmée dans toutes les études. Certaines études ont trouvé une relation positive entre le niveau de développement économique et l'impact environnemental (par exemple, les émissions de dioxyde de soufre), tandis que d'autres ont trouvé des preuves mitigées ou aucune relation significative. Il existe peu d'études testant l'hypothèse CKE avec la consommation d'énergie. À la connaissance des auteurs, seules cinq études ont testé l'hypothèse CKE, et quatre études ont analysé les relations causales entre la consommation d'énergie, l'empreinte écologique et émissions de CO₂. Bien qu'il n'y ait pas de contrainte de données sur la consommation d'énergie, cela montre qu'il y a un manque dans la littérature sur la consommation d'énergie, la croissance économique et la pollution environnementale.

3. Variables et méthodes d'analyse

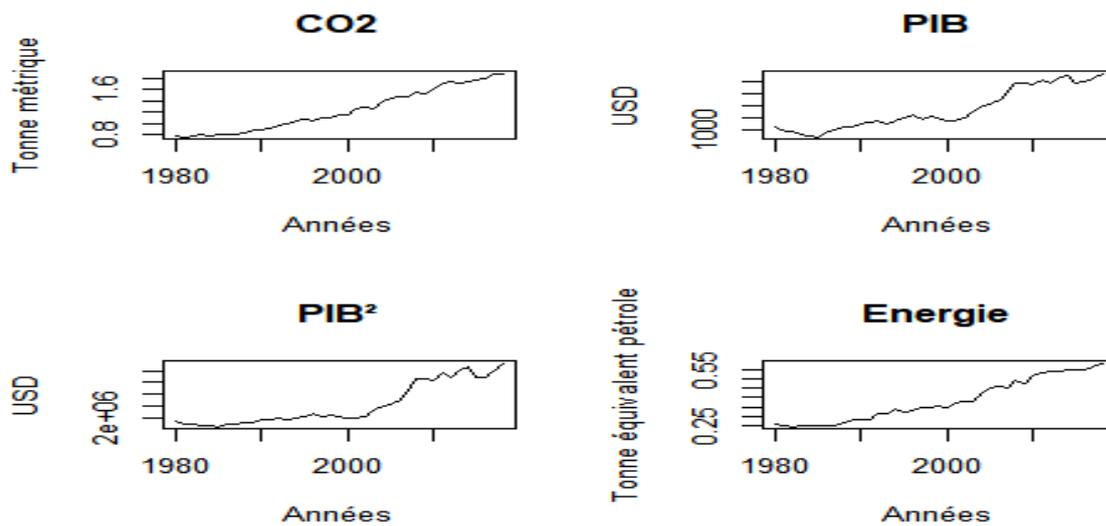
3.1. Variables retenues et description des données

La théorie de la CKE prend la forme d'une relation non linéaire entre une variable de dégradation à expliquer, et le PIB et PIB² pour donner l'allure d'une courbe en U inversée. La variable de dégradation environnementale qu'on a choisie est le CO₂. Ce choix est dû à deux raisons principales : La première est que l'étude porte sur une échelle macroéconomique, qui prend en compte l'ensemble du territoire Marocain, ce qui avantage le CO₂ qui est une variable qui peut être quantifiable, ce qui est souhaitable pour une étude économétrique. Le deuxième point, c'est que le Maroc s'inscrit dans une perspective de respect de l'environnement et signataire de plusieurs traités internationaux liés à la préservation de l'environnement, notamment en réduisant ses émissions de CO₂ et en optant pour des composantes de production moins polluantes. Une étude sur la validité de la CKE avec le CO₂ comme variable explicative peut être intéressante dans la mesure où on pourrait savoir si l'augmentation du CO₂ est un effet de la croissance économique ou sujet à d'autres causes qui pourront faire l'objet d'autres études.

Plusieurs études ont opté pour le même choix de variables comme Ahmad et al., (2017), Kanjilal et Ghosh (2013). Le teste de la consommation de l'énergie et des émissions de CO₂ au Maroc est d'autant importante puisqu'il s'agit d'un secteur primordial pour le royaume, et qui fait

l'objet d'une très grande dépendance vis-à-vis de l'étranger. Plusieurs études démontrent une causalité entre la demande en énergie et les émissions de CO₂ (Bowden et Payne, 2010 et Shahbaz et al., 2013). L'influence de l'énergie par habitant nous permet de l'ajouter comme variable explicative avec le revenu par habitant, par sa causalité théorique sur les émissions de CO₂. Les données sont déduites de la base de données de la Knoema pour la période allant de 1980 à 2018. La figure 1 présente l'évolution du PIB, CO₂ et l'énergie au Maroc de 1980 à 2018.

Figure 1: Graphique de l'évolution du PIB, CO₂ et l'énergie au Maroc de 1980 à 2018



Source : Calculs de l'auteur

D'après les graphiques de la figure 1 on remarque une corrélation positive entre le PIB, l'énergie et le CO₂. La courbe de l'énergie et de CO₂ suit une tendance quasi linéaire et croissante avec des petits pics. Cependant, le PIB suit une tendance haussière avec des hauts et des bas, en parle d'une croissance en dent-de-scie, puisque le PIB marocain est fortement impacté par le niveau de pluviométrie. Le CO₂ se compte à la tonne métrique comme le suggère la littérature. Nous avons choisi de travailler avec l'énergie consommée par habitant en tonne équivalente pétrole, pour ressortir la partie polluante de la consommation énergétique marocaine. Pour ce qui est du PIB nous avons choisi de travailler avec le PIB réel par habitant en dollars, puisqu'il s'agit d'une relation d'impact sur le CO₂, pour des études comparatives avec d'autres pays il est souhaitable dans ce cas de s'orienter vers la parité de pouvoir d'achat.

3.2. Modèle théorique et présentation du Modèle ARDL

Le modèle à estimer qui sera pour la période allant de 1980 à 2018, prend la forme prescrite par la théorie de la CKE est le suivant :

$$CO2_t = a_0 PIB_t^{a_1} \quad (1)$$

$CO2_t$: Vecteurs des émissions de carbone en tonne métrique par habitant.

PIB_t : Vecteur du PIB réel par habitant en dollars Américain.

PIB_t^2 : Vecteur du PIB carré en dollars américain.

EC : Vecteur de l'énergie consommée en tonne équivalent pétrole.

e_t : Le terme d'erreur.

t : indice de temps allant de 1980 à 2018.

Afin de tester la CKE et l'influence de l'énergie avec une plus grande précision, il est préférable de faire une transformation logarithmique pour le modèle Shahbaz et al. (2013). L'équation (1) prendra alors la forme suivante :

$$\ln CO2_t = a_0 + a_1 \ln PIB_t + a_2 \ln PIB_t^2 + a_3 \ln EN + e_t \quad (2)$$

La théorie de la CKE nous dit que pour qu'il y est une relation de courbe en U inversé, il faut que le signe de a_1 soit positive $a_1 > 0$ et que a_2 soit négative $a_2 < 0$. Pour que l'énergie consommée par habitant EC influence les émissions de $CO2$, alors a_3 doit être positive $a_3 > 0$. Les résultats attendus sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1: Les résultats attendus de la relation de courbe en U inversé

Variables	Description	Effets Attendue
CO2	Emissions de carbone en tonne métrique par habitant	
PIB	PIB réel par habitant en dollars Américain	+
PIB ²	PIB carré réel par habitant en dollars Américain	-
EC	Energie consommée en tonne équivalent pétrole	+

Source : Calculs de l'auteur

Afin d'estimer le modèle (2), en privilégiant les modèles dynamiques puisqu'il s'agit d'une série chronologique allant de 1980 à 2018. Le modèle qu'on a choisi pour notre étude est le modèle autorégressif à retard distribué (ARDL). Le choix du modèle porte sur sa capacité à capter les effets temporels de court et du long terme, ce qui est crucial pour l'estimation de la relation de CKE.

Dans le modèle autorégressif, la variable endogène est expliquée par ses propres valeurs décalées (AR), et les valeurs des variables exogènes décalées (DL). Le modèle ARDL ne se

soucie pas de l'ordre d'intégration des variables I(0) ou I(1) ou les deux réunis I(0)/I(1), cependant il ne peut pas estimer un modèle avec un ordre d'intégration supérieur à I(1). Dans ce dernier cas, il faut s'orienter vers d'autres méthodes d'estimation. Un autre mérite de l'ARDL est qu'il est efficace pour les échantillons de petite taille ce qui est le cas de notre étude portant sur une période allant de 1980 à 2018.

La forme du modèle ARDL dérivé de l'équation (2) est la suivante :

$$\Delta \ln CO_{2t} = a_0 + \sum_{i=1}^q \Delta \ln CO_{2t-i} + a_1 \sum_{i=0}^p \Delta \ln PIB_{t-i} + a_2 \sum_{i=0}^p \Delta \ln PIB_{t-i}^2 + a_3 \sum_{i=0}^p \Delta \ln EC_{t-i} + b_1 CO_{2t-1} + b_2 PIB_{t-1} + b_3 PIB_{t-1}^2 + b_4 EC_{t-1} + e_t \quad (3)$$

Δ : Opérateur de différence première.

a_0, a_1, a_2, a_3 : Traduisent les effets à court terme.

b_1, b_2, b_3, b_4 : Traduisent les effets de long terme.

Pour fixer les décalages optimaux p et q, nous privilégierons le critère AIC pour son efficacité concernant les petits échantillons Shahbaz et al. (2013). Si les coefficients traduisent les effets à court terme, alors en pourrait déduire la relation de long terme avec l'équation (4) :

$$Y_t = K + \lambda X_t + e \quad (4)$$

L'estimation de l'effet de long terme peut être déduite par l'estimation de ϕ , via l'équation (5) suivante :

$$\phi = \frac{\sum b_j}{\sum (1 - a_i)} \quad (5)$$

3.2.1. Test de cointégration aux bornes

Afin d'estimer le modèle ARDL sous la forme de l'équation (3), il est supposé que les variables soient cointégrées. On dit que deux séries sont cointégrées s'il est possible d'exprimer une combinaison linéaire des deux séries qui sera intégrée d'ordre inférieur (Mills, 2015). La littérature économétrique regorge d'une multitude de tests de cointégration. On peut citer le test de Engle et Granger (1991) et Johansen (1988), pour la cointégration des variables. Cependant ces tests souffrent d'une contrainte d'intégration des variables qui peuvent être intégrées d'ordre I(0) ou I(1), mais ne peuvent pas être applicable à des séries intégrées d'ordre mixte I(0)/I(1). Ces contraintes sont contrecarrées par le test de (Pesaran et al., 2001), qui ne se soucie pas de l'ordre d'intégration qui peut être sous la forme I(0), I(1) ou I(0)/I(1).

Afin de tester l'existence ou non d'une relation de cointégration entre les variables par le test de cointégration aux bornes Pesaran et al. (2001), il est nécessaire d'estimer un modèle à correction d'erreurs (MCE), la spécification de l'équation (3) deviendra comme suit :

$$\Delta \ln CO_{2t} = a_0 + \sum_{i=1}^q \Delta \ln CO_{2t-i} + a_1 \sum_{i=0}^p \Delta \ln PIB_{t-i} + a_2 \sum_{i=0}^p \Delta \ln PIB_{t-i}^2 + a_3 \sum_{i=0}^q \Delta \ln EN_{t-1} + b_2 MCE + e_t \quad (6)$$

b_2 : Est le coefficient de correction d'erreurs ou force de rappelle.

Pour qu'il y'est une cointégration, il faut que \hat{b}_2 soit statistiquement significative et dans l'intervalle $0 < \hat{b}_2 < 1$, afin de rejeter l'hypothèse nulle de non-cointégration. Les décalages optimaux de l'équation (6) seront déterminés à partir du critère AIC. Le coefficient \hat{b}_2 , doit impérativement avoir un signe négatif et être significatif.

Pour déterminer l'existence de cointégration on pose les hypothèses suivantes:

- H_0 : Si $b_1 = b_2 = b_3 = b_4 = b_5 = b_6 = 0$ il y'a pas de relation de cointégration.
- H_1 : Si $b_1 \neq b_2 \neq b_3 \neq b_4 \neq b_5 \neq b_6 \neq 0$ il y'a une relation de cointégration.

Le test de Pesaran et al. (2001), ce manifeste par la comparaison du F de Fisher obtenue aux différentes bornes simulées pour différentes bornes critiques, pour un seuil d'acceptabilité allant de 1% à 10% tel que :

Fisher calculé > borne supérieure	Il existe une relation de cointégration
Fisher calculé < borne supérieure	Il n'existe pas une relation de cointégration
Borne inférieure < Fisher calculé < Borne supérieure	Pas de conclusion

Source : Calculs de l'auteur

3.2.2. Post-estimation : CUSUM et CUSUMQ

Après estimation du modèle plusieurs tests d'hétéroscédasticité et de normalité des erreurs sont souhaités comme complément à l'étude. Dans ce présent travail, nous allons privilégier le CUSUM pour (Cumulative Sum Of Recursive Residuals) et CUSUMQ pour (Cumulative *Sum of Squares of Recursive Residuals*), sont conduit pour tester la stabilité de l'ARDL (Shahbaz, 2012).

4. Résultats empiriques et discussion

4.1. Test de racine unitaire

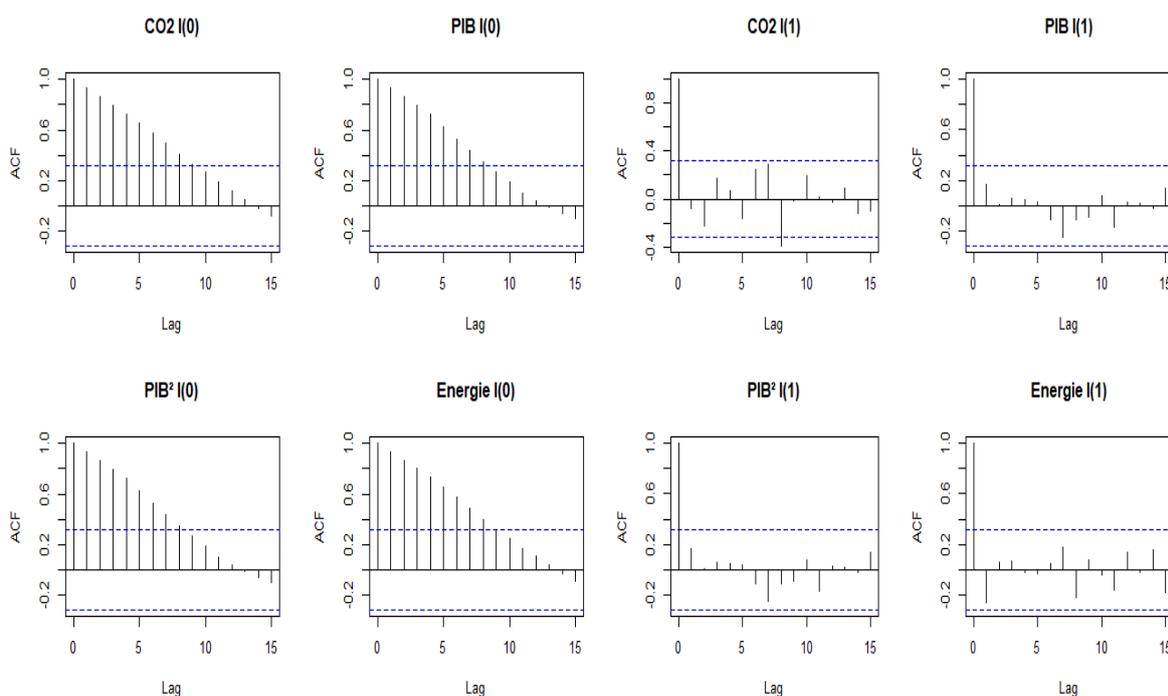
Le test de stationnarité de Dicky-Fuller démontre une stationnarité des variables aux premiers niveaux I (1) pour un seuil maximal de 5%. Le graphique de la figure 2, montre les valeurs de l'autocorrélation des variables par apport à ses propres valeurs décalé dans le temps.

Tableau 2: Test de stationnarité de Dicky-Fuller en constante et en tendance

Variabes	t-calculé	Probabilité	Observations
LnCO_2_t	-2.5005		Non-stationnaire
ΔLnCO_2_t	-6.0643	0.01	Stationnaire
LnPIB_t	-2.2094	$0.1 < p$	Non-stationnaire
ΔLnPIB	-3.9073	0.05	Stationnaire
LnPIB_t^2	-2.2094	$0.1 < p$	Non-stationnaire
ΔLnPIB^2	-3.9073	0.05	Stationnaire
LnEC	-2.5593	$0.1 < p$	Non-stationnaire
ΔLnEC^2	-5.0721	0.01	Stationnaire

Source : Calcul des auteurs

Figure 2: Graphique d'autocorrélation de I(0) et I(1)



Source : Calculs de l'auteur

La figure 2 montre une tendance baissière de l'autocorrélation des valeurs passées à la valeur présente. La non-stationnarité est plus limpide puisque les valeurs des segments dépassent la ligne pointillée en bleu. Lors de la première différence I (1). On voit bien que les valeurs sont dans le carré tracé par les deux axes bleus ce qui signifie qu'il existe une stationnarité des variables dans la première différence.

4.2. Test de cointégration aux bornes

Le test cointégration est effectué selon Pesaran et al. (2001), en d'autres termes le test sera effectué sans tendance et avec constante case. Le tableau 3 montre que le F statistique calculé qui est de 4.1905, est supérieur à la borne supérieure de 4.02 avec un seuil de 10%. Cela implique que l'hypothèse nulle de non-cointégration est rejetée avec un intervalle de confiance supérieur à 90 %.

Tableau 3: Bound Test ARDL

F.stat calculée	4.1905	
K	3	
Seuil critique	Borne Inférieure I(0)	Borne supérieure I(1)
10%	2.933	4.02
5%	3.548	4.803
1%	5.018	6.61

Source : Calculs de l'auteur

4.3. Tests de diagnostic

Maintenant il faut voir ce que le modèle respecte les normes de la régression linéaire normale. L'analyse de sensibilité indique que le modèle à court terme passe avec succès tous les tests de diagnostic, c'est-à-dire, le test de la normalité, la corrélation des erreurs, et les problèmes hétéroscédasticité. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.

On constate que le modèle de court terme ne montre aucune preuve de non-normalité du terme résiduel et implique que le terme d'erreur est normalement distribué avec une moyenne et une covariance nulle, puisque les résultats du test de Shapiro-Wilk démontrent que les résidus sont normalement distribués. Une corrélation existe entre le terme d'erreur et les émissions de CO₂. Le test Breusch-Pagan démontre l'absence d'hétéroscédasticité des résidus. Il n'y a pas d'hétéroscédasticité conditionnelle autorégressive et la même inférence est tirée au sujet de l'hétéroscédasticité blanche. Le test de Ljung-Box démontre qu'il n'existe pas d'autocorrélation d'erreurs. Le test respecte les conditions de la régression linéaire.

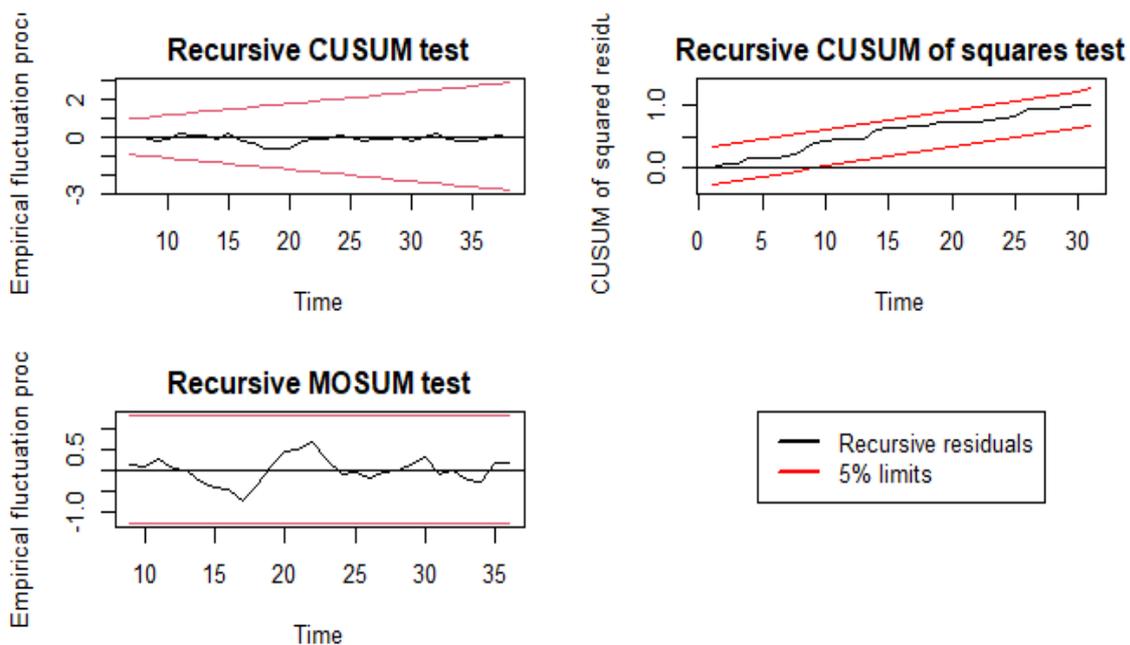
Également, les tests du CUSUM, CUSUMQ et MOSUM démontrent que les coefficients sont stables dans le temps, puisqu'ils ne dépassent pas la limite de 5% représenté par une ligne rouge. Le modèle dans sa globalité est stable.

Tableau 4: Tests de robustesse diagnostic

Test	P-value Attendue	Résultat P Value
Shapiro-Wilk : Normalité	Élevé	0.98
Breusch-Pagan : homoscedasticité	Élevé	0.89
Ljung-Box : Autocorélation	Élevé	0.59

Source : Calcul des auteurs

Figure 3: Test de stabilité du modèle



Source : Calculs de l'auteur

4.4. Estimation des relations à long et le modèle à correction d'erreurs

Le tableau 5 montre les résultats de court terme et long terme après la validation de la cointégration par la technique ARDL. Le terme de correction d'erreur qui est égale à -0.57285 a une valeur négative, et hautement significative. Ce qui nous permet d'estimer la dynamique du long terme.

La dynamique de court terme nous montre qu'il n'existe pas de relation entre le PIB, PIB² et de CO₂ puisque la p-valeur des deux PIB n'est pas significative, mais leurs signes sont favorables

pour une la CKE. Le PIB égale à 0.35 et le PIB² égale à -0.02, bien que leurs signes tracent une courbure de type U inversé, il n'existe pas de relation avec CO₂, en l'absence de significativité. L'énergie consommée par habitant EC, impacte positivement les émissions de CO₂ de l'ordre de 0.73 avec une p-value qui est proche de 0, ce qui démontre qu'il existe une relation de causalité entre l'énergie consommée et le CO₂ à court terme. Dans l'ensemble le modèle est significatif avec un R ajusté de 0.73.

Les coefficients de long terme montrent qu'il existe effectivement une relation de long terme entre le PIB et le CO₂, puisque la p-valeur des deux PIB et PIB² est inférieur au seuil de 10%. Le type de cette relation est de forme U inversée, puisque le coefficient du PIB est positif d'ordre 0.72, et le PIB² est négatif d'ordre -0.060.

Donc les résultats du long terme confirment l'existence d'une CKE au Maroc pour la période allant de 1980 à 2018. La consommation énergétique par habitant impact positivement les émissions de CO₂, à la fois pour le court et le long terme. L'énergie consommée par habitant à une plus grande influence sur le CO₂ qu'est le PIB puisque le coefficient estimé est d'ordre 1.30.

Tableau 5: Résultats de court terme et long terme

Coefficients	Estimation	Ecart type	t-statistique	P-value
Coefficients de long terme				
Constante	-0.54152743	1.41470395	-0.382785	0.704
PIB	0.72523968	0.40175622	1.805173	0.0818
PIB ²	-0.06052391	0.028447980	-2.125152	0.0425
EC	1.305094	0.09624482	13.560	~0
Modèle à correction d'erreurs (court terme)				
ECT (-1)	-0.55667	0.12922	-4.308	~0
PIB	0.35475	0.41261	0.860	0.3965
PIB ²	-0.02771	0.02870	-0.965	0.3417
EC	0.73235	0.07859	9.318	~ 0
ECT: Terme de correction d'erreur				

Source : Calculs de l'auteur

4.4. Discussion des résultats

Dans ce papier nous nous sommes livrés à une étude de la relation existante entre le revenu par habitant et les émissions de CO₂, pendant la période allant de 1980 à 2018. Les résultats de l'étude démontrent qu'il existe une courbe de Kuznet environnementale au Maroc pendant la

période allant de 1980 à 2018. Pour le court terme il n'existe aucune relation entre le PIB et de CO₂, mais dans le long terme il existe effectivement une relation de type U inversée. L'énergie impacte les émissions de CO₂, à la fois pour le court terme et le long terme, avec un taux très élevé.

Les résultats obtenus décrivent parfaitement la situation du Maroc. Les composantes du PIB n'expliquent pas les émissions de CO₂, puisque l'industrie qui est responsable généralement des émissions de CO₂, ne s'élève qu'à 20% du PIB. L'agriculture qui est parmi les secteurs les plus émetteurs de CO₂ dans le monde et qui présente 30% de la richesse du Maroc, n'explique pas les émissions des GES en général et du CO₂ en particulier, pour le cas marocain. Ce qui rend l'agriculture un principal émetteur de GES est l'élevage des bovins, ce qui n'est pas le cas du royaume dont l'agriculture est spécialisée dans les denrées alimentaires. Ceci explique les raisons de la non-significativité du revenu par habitant dans le court terme. L'énergie par habitant est très consommatrice d'énergie fossile ce qui a pour conséquence un impact dans le court et le long terme. Cela dit l'énergie n'entre pas dans la composition du PIB puisqu'elle est importée de l'extérieur à hauteur de 90%. L'impact du PIB sur les émissions de CO₂, qui suit une tendance de forme U inversé peut être expliqué par les stratégies nationales du Maroc pour l'horizon 2030.

Sur le plan énergétique et industriel, le Maroc investit dans des politiques durables via l'installation de pacs éolien et des stations solaires. Cette démarche d'importation des technologies moins polluantes favorisent la baisse des émissions de CO₂. Les différentes politiques de développement favorisent fortement la diminution des émissions des GES, notamment l'implantation des parcs éoliens qui ont un double objectif : diminuer à la fois la pollution émise et la dépendance énergétique. Le Maroc rend réaliste ces objectifs de 2030 par l'introduction du privé dans la génération de l'électricité par le renouvelable via l'instauration d'une législation qui leur ouvre l'accès au réseau national. Tous ces éléments expliquent le point d'inflexion de la courbe de Kuznet au Maroc à long terme. Cependant, dans d'autres pays similaires au Maroc à travers leur dépendance aux énergies fossiles, relatent d'autres causes qui expliquent l'existence de la CKE, comme un changement de régime du communisme à la démocratie par exemple.

L'étude effectuée par Shahbaz et al. (2013) avait des résultats similaires aux nôtres, sachant qu'en Roumanie l'impact de l'énergie sur les émissions de CO₂, est aussi tangible. Toutefois, les résultats démontrent qu'il existe une relation de forme U inversée concernant les revenus par habitant pour le court et le long terme. Les résultats de notre étude démontrent qu'il n'existe pas de relation significative entre les deux puisque pour le cas du Maroc l'industrie n'est pas

une composante principale du PIB. Tandis que, en Roumanie c'est le changement de régime politique du communisme à un régime démocratique et son adhésion dans l'union européenne, qui ont atténués ses émissions de CO₂.

L'impact de l'énergie en Roumanie et au Maroc sur les émissions de CO₂, est direct ce qui a poussé d'autres chercheurs à tester la courbe environnementale de l'énergie de Kuznets. En mettant directement l'énergie consommée comme variable endogène. Une étude réalisée sur des données de panel dans les pays de caraïbe (Pablo-Romero et De Jesús, 2016), démontre qu'il n'existe pas de relation en forme d'U inversé entre l'énergie consommée et le PIB, cependant il existe une relation linéaire entre les deux. L'étude de la courbe de l'énergie environnementale de Kuznets est intéressante pour les pays importateurs d'énergie fossile comme le Maroc.

Notre étude n'est qu'un début de plusieurs pistes qui peuvent être réalisées pour l'examen de la CKE. À titre d'exemple l'investigation sur l'existence de la courbe de l'énergie environnementale de Kuznet qui prend comme variable de dégradation directement la consommation des énergies fossiles. Le test de la validité de la CKE peut regrouper une multitude de variables de dégradation issues des sciences naturelles, comme le stock de biodiversité ou la dégradation des forêts des aires Martine ou encore des ressources halieutiques. Les investigations ne peuvent pas se limiter au plan macroéconomique comme c'est le cas dans le présent travail, mais il peut aussi être intéressant de tester la CKE sur le plan local, par exemple le revenu des habitants d'une ville et les particules en suspension.

5. Conclusion

Dans cet article nous nous sommes livré à tester l'existence de la CKE au Maroc. Nous avons tenté d'estimer la validité de l'hypothèse de la CKE, via le modèle ARDL. L'objectif était de voir si le PIB par habitant influence les émissions de CO₂ et voir aussi l'impact de l'énergie consommée par habitant et ses émissions, puisque l'énergie n'est pas imputable au PIB. L'investigation d'une quelconque relation entre la croissance d'une manière générale et une variable de dégradation environnementale est importante dans le contexte marocain puisque le pays prétend suivre un itinéraire de développement durable à long terme.

En fait, nous nous sommes efforcés de présenter les mécanismes théoriques qui régissent les fondements de la CKE. Nous nous sommes aussi donné pour objet de présenter les différents travaux empiriques concernant la CKE. On a vu que les fondements théoriques de la CKE sont simples à appréhender dans un premier temps puisqu'elle décrit une courbe en U inversée qui met en relation une variable de dégradation environnementale et le PIB. Dans cette facilité théorique se cachent des questionnements importants, comme la nature de la dégradation et la mesure de cette dernière. Dans la littérature empirique plusieurs travaux ont effectué des innovations concernant les variables de dégradations et les variables exogènes additifs, par exemple le crime environnement ou encore la biodiversité.

Aussi, nous nous sommes intéressées à une mise en contexte du Maroc et de ces spécificités historiques et de ces défis économiques. Cette compréhension nous a permis de faire le choix de chaque variable que nous avons intégré à notre modèle. Le Maroc dispose d'une croissance dépendante des précipitations ; on parle d'une croissance pluviométrique. Le royaume est très dépendant de l'énergie fossile importé à hauteur de 90 %. La dégradation de l'environnement dans le pays est très divergente à la fois par la déforestation, l'urbanisation, la consommation accrue de la ressource hydrique, et la pollution de l'air. Tous ces points nous interpellent sur d'autres perspectives d'études comme la courbe environnementale de l'énergie ou encore la courbe de Kuznets locale c'est-à-dire dans une ville, où des données de panels de plusieurs villes et la pollution de l'air.

Notre étude qui s'étale sur la période allant de 1980 à 2018 démontre l'existence d'une courbe de Kuznets environnementale à long terme. Dans le court terme il n'existe pas de relation entre le PIB et de CO₂, mais l'énergie a un impact direct sur les émissions de CO₂, à la fois à court et à long terme. Cet impact est dû à la prépondérance des énergies fossiles dans les composantes énergétiques du Maroc ce qui nous amène à une autre perspective d'étude intéressante à savoir la courbe environnementale de l'énergie de Kuznets.

Le réchauffement climatique est le défi majeur du XXI siècle par excellence. Les papiers de recherches se multiplient dans toutes les disciplines pour comprendre les enjeux et l'impact d'un changement climatique global. L'objectif de ce travail est d'examiner la relation existante entre le revenu par habitant, la consommation énergétique et les émissions de CO₂ au Maroc au cours de la période allant de 1980 à 2018. En s'appuyant sur le modèle ARDL les résultats obtenus confirment l'existence d'une relation de type U inversée à court et à long terme entre le CO₂ et les revenus par habitant. Cependant, à court terme les résultats montrent que le revenu n'explique pas les émissions de CO₂. En outre, les résultats obtenus dévoilent un effet positif et significatif aussi bien à court qu'à long terme de la consommation de l'énergie sur les émissions de CO₂.

BIBLIOGRAPHIE

Ahmad, N., Du, L., Lu, J., Wang, J., Li, H. Z., & Hashmi, M. Z. (2017). Modelling the CO₂ emissions and economic growth in Croatia: is there any environmental Kuznets curve?. *Energy*, 123, 164-172.

Akca, H. (2021). Environmental Kuznets Curve and financial development in Turkey: evidence from augmented ARDL approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(48), 69149-69159.

Arrow, K., Bolin, B., Costanza, R., Dasgupta, P., Folke, C., Holling, C. S., ... & Pimentel, D. (1995). Economic growth, carrying capacity, and the environment. *Ecological economics*, 15(2), 91-95.

Bello, M. O., Solarin, S. A., & Yen, Y. Y. (2018). The impact of electricity consumption on CO₂ emission, carbon footprint, water footprint and ecological footprint: the role of hydropower in an emerging economy. *Journal of environmental management*, 219, 218-230.

Belloumi, M. (2009). Energy consumption and GDP in Tunisia: Cointegration and causality analysis. *Energy policy*, 37(7), 2745-2753.

Bildirici, M. E., & Gökmenoğlu, S. M. (2017). Environmental pollution, hydropower energy consumption and economic growth: Evidence from G7 countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 68-85.

Bowden, N., & Payne, J. E. (2010). Sectoral analysis of the causal relationship between renewable and non-renewable energy consumption and real output in the US. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 5(4), 400-408.

Destek, M. A., & Sinha, A. (2020). Renewable, non-renewable energy consumption, economic growth, trade openness and ecological footprint: evidence from organisation for economic Co-operation and development countries. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118537.

Destek, M. A., Ulucak, R., & Dogan, E. (2018). Analyzing the environmental Kuznets curve for the EU countries: the role of ecological footprint. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(29), 29387-29396.

Engle, R., & Granger, C. (1991). *Long-run economic relationships: Readings in cointegration*. Oxford University Press.

- Germani, A. R., Ker, A. P., & Castaldo, A. (2020). On the existence and shape of an environmental crime Kuznets Curve: A case study of Italian provinces. *Ecological Indicators*, 108, 105685.
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991). Environmental impacts of a North American free trade agreement.
- Johansen, S. (1988). Statistical analysis of cointegration vectors. *Journal of economic dynamics and control*, 12(2-3), 231-254.
- Johansen, S. (1988). Statistical analysis of cointegration vectors. *Journal of economic dynamics and control*, 12(2-3), 231-254.
- Kanjilal, K., & Ghosh, S. (2013). Environmental Kuznet's curve for India: Evidence from tests for cointegration with unknown structural breaks. *Energy Policy*, 56, 509-515.
- Khanna, N., & Plassmann, F. (2004). The demand for environmental quality and the environmental Kuznets Curve hypothesis. *Ecological Economics*, 51(3-4), 225-236.
- Kim, Y., & Lee, J. (2020). Testing the environmental Kuznets curve: Evidence from OECD countries. *Environmental Economics and Policy Studies*, 22(4), 829-844.
- Lee, J., Kim, Y., & Kim, S. (2019). Testing the environmental Kuznets curve: A panel data analysis of CO2 emissions. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(14), 14185-14196.
- Mills, T. C. (2015). *Time series econometrics: a concise introduction*. Springer.
- Ministère de l'Énergie. (2020). Projet de NOOR Ouarzazate IV (70 MW). mem.gov.ma. Récupéré à partir de <https://www.mem.gov.ma/Pages/secteur.aspx?e=2&sprj=28>
- Mekhilef, S., Saidur, R., & Kamalisarvestani, M. (2012). Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(5), 2920-2925.
- Pesaran, M. H., Shin, Y., & Smith, R. J. (2001). Bounds testing approaches to the analysis of level relationships. *Journal of applied econometrics*, 16(3), 289-326.
- Sari, R., & Soytas, U. (2007). The growth of income and energy consumption in six developing countries. *Energy Policy*, 35(2), 889-898.

Atasoy, B. S. (2017). Testing the environmental Kuznets curve hypothesis across the US: Evidence from panel mean group estimators. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 731-747.

Shahbaz, M. (2012). Does trade openness affect long run growth? Cointegration, causality and forecast error variance decomposition tests for Pakistan. *Economic Modelling*, 29(6), 2325-2339.

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.

Uchiyama, K. (2016). Environmental Kuznets curve hypothesis. In *Environmental Kuznets curve hypothesis and carbon dioxide emissions* (pp. 11-29). Springer, Tokyo.

Ulucak, R., & Khan, S. U. D. (2020). Determinants of the ecological footprint: role of renewable energy, natural resources, and urbanization. *Sustainable Cities and Society*, 54, 101996.

Vogel, M. (1999). *Environmental Kuznets curves: a study on the economic theory and political economy of environmental quality improvements in the course of economic growth* (Vol. 469). Springer Science & Business Media.