

L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air : une autre approche de la courbe environnementale de Kuznets

Myriam BEN SAAD*

Résumé - L'objectif de cet article est de mettre en évidence, au-delà de l'effet du PIB par habitant, le rôle majeur de l'évolution des transformations structurelles sur le niveau de pollution de l'air (émissions de CO₂/tête), en reprenant autrement le modèle de la courbe environnementale de Kuznets, estimé sur un échantillon de 133 pays de 1984 à 2014. L'influence des changements structurels sur la pollution est évaluée de manière originale par un indice de complexité économique. La diminution relative de la pollution à partir d'un certain seuil, particulièrement perceptible dans les pays à revenu élevé, résulte davantage d'une large transformation structurelle que du niveau de développement, même s'il peut exister un certain lien entre eux. Nous montrons que l'accroissement de la complexité économique permet plus rapidement d'atteindre le seuil de retournement du niveau de pollution que l'accroissement du PIB/tête. Ce résultat laisse apparaître que pour réduire la pollution, le mode de croissance et les spécialisations productives sont plus importants que la croissance elle-même et le niveau de développement économique atteint.

Classification JEL

L16, Q53, Q56, O11, C32

Mots-clés

Complexité économique
Pollution de l'air
Courbe environnementale de Kuznets
Transformation structurelle
Panel dynamique

Je voudrais remercier le Professeur Maurice Catin pour ses précieux conseils, ses encouragements et surtout son importante contribution tout au long de l'écriture de cet article.

*LEAD, Université de Toulon ; myriambensaad@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

Le changement climatique principalement dû à l'accumulation de gaz à effet de serre, dont le principal est le dioxyde de carbone (CO₂), représente aujourd'hui un problème sérieux pour l'humanité¹. Une progression sensible de la pollution apparaît depuis les trois dernières décennies. Les émissions de CO₂ en provenance des pays de l'OCDE ont doublé sur la période 1984-2014 avec néanmoins une légère diminution suite à l'entrée en vigueur du protocole de Kyoto (2005). L'émission des pays de l'OCDE est significativement supérieure à la quantité de CO₂ émise par les autres régions du monde, à l'exception des pays de l'Asie du Sud-Est. La région méditerranéenne, l'Amérique latine et l'Afrique subsaharienne ont, elles, doublé leurs émissions de CO₂ sur la période 1984-2014, même si leurs émissions ne représentent que 1/6 de la quantité émise par les pays de l'OCDE et d'Asie du Sud-Est (annexe 1, graphique 1). Si l'on envisage les émissions par habitant, la région MENA figure parmi les économies en développement les plus émettrices de gaz à effet de serre, mais elle reste néanmoins largement derrière les pays de l'OCDE (annexe 1, graphique 2).

L'impact du développement économique sur la qualité de l'environnement a été largement discuté dans la littérature économique. L'étude de Grossman et Krueger (1991, 1994, 1995) notamment a fait l'objet d'un consensus grandissant sur l'existence d'une relation en forme de U inversé entre le revenu par habitant et la pollution : on parle alors de la courbe environnementale de Kuznets (CEK). A la suite de ce travail théorique, de nombreuses études empiriques ont justifié l'hypothèse de la CEK (Stern et al., 1996 ; Ekins, 1997 ; Stern et Common, 2001...). Toutefois elles ont pu être critiquées de différentes manières. En particulier, les types d'activités économiques à la base de la croissance ont des intensités de pollution qui diffèrent (Antweiler et al., 2001). Ainsi, il peut être judicieux de déterminer si la réduction relative de la pollution observée dans les pays à partir d'un certain seuil est le résultat de changements dans les structures sectorielles au-delà de l'effet du niveau de développement.

Dans ce travail, nous utilisons le cadre théorique de la CEK pour tester l'effet sur l'environnement de la structure sectorielle et de l'usage de produits moins polluants, en considérant un panel dynamique de 133 pays. Notre démarche est singulière dans le choix de l'indicateur relatif à l'effet de structure : il s'agit de l'indice de complexité économique (ICE) (Hidalgo et al., 2009) qui reflète les capacités d'exportation d'une économie basée sur la « qualité des produits ». Cet indicateur est en règle générale utilisé pour caractériser la place des pays dans le commerce international mais jamais sur les questions environnementales. ICE intervient dans notre analyse comme variable explicative en complément du revenu par habitant dans la CEK. En testant la complexité économique, nous essayons de suggérer des trajectoires autres que la CEK classique en introduisant un élément plus particulier qui joue sur l'environnement au-delà du simple revenu par habitant. Les estimations sont effectuées sur l'ensemble des pays considérés mais aussi pour des groupes de pays, à revenu élevé, intermédiaire ou faible. Il apparaît en particulier que le groupe des pays à revenu élevé connaît une intensité de pollution par habitant plus importante dans ses premiers stades de transformation structurelle et qui tend à diminuer au-delà d'un certain seuil.

Notre travail est organisé autour de 4 sections. Dans la deuxième section, nous exposons les éléments de littérature consacrés au modèle CEK et notamment la caractérisation des effets d'échelle, technique et de structure pouvant conditionner

¹ Par exemple, selon l'Organisation mondiale de la Santé (2014), près de 7 millions de personnes sont décédées prématurément en 2012 du fait de l'exposition à la pollution de l'air.

les émissions de CO₂. Dans une troisième section, nous proposons une nouvelle spécification du modèle CEK introduisant notamment l'indice de complexité économique, et qui est estimé en nous basant sur un panel de 133 pays sur la période 1984-2014. La quatrième section est consacrée à l'analyse des résultats en considérant l'ensemble des pays puis les groupes de pays selon leur niveau de développement. La section 5 conclut.

2. LA COURBE ENVIRONNEMENTALE DE KUZNETS : REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1. La construction théorique de la CEK

Kuznets (1955) tend à déceler une relation en U inversé entre le niveau de revenu par tête des pays et les inégalités sociales. En transposant cette relation dans le domaine de l'environnement, différentes études ont laissé apparaître une relation en U inversé entre la pollution et le niveau de revenu par tête des pays. On parle alors de « courbe environnementale de Kuznets » (Grossman et Krueger, 1991 ; Panayotou, 1993). A des niveaux de revenu par habitant très faibles, la quantité et l'intensité de pollution d'origine anthropique se limitent à l'impact des activités économiques de subsistance. Avec l'urbanisation, l'intensification de l'agriculture et le décollage industriel, les émissions de polluants augmentent fortement. Dans les pays en développement, la partie montante de la CEK paraît être la conséquence de l'augmentation du PIB par tête.

De manière générale, l'évolution de la courbe en cloche a pu être expliquée par trois effets. Le premier est l'effet d'échelle, où une augmentation de l'activité économique conduit, en elle-même, à une pression plus forte sur l'environnement : plus de production nécessite plus d'inputs et crée ainsi plus de déchets et d'émissions polluantes.

Le deuxième est l'effet de composition sectorielle, où à mesure que les richesses s'accumulent la structure du système productif d'une économie évolue. Par exemple, le déclin de la part des industries lourdes intensives en énergie et le développement des secteurs de services intensifs en technologie et en capital humain desserrent la contrainte écologique en diminuant l'intensité des émissions.

Le troisième est l'effet technique, où l'éducation, les innovations et le développement des activités de R&D peuvent conduire à l'utilisation de produits moins polluants et à une meilleure efficacité écologique des procédés de fabrication. Par exemple, les innovations permettent de remplacer des machines polluantes par des équipements plus performants sur le plan environnemental.

L'existence d'une CEK suppose qu'au-delà d'un seuil de revenu par tête, l'effet de composition et l'effet technique peuvent contrebalancer l'effet d'échelle, au point d'amener une réduction relative de la pollution (Stern, 2003).

2.2. La littérature empirique

Une vaste littérature explore la portée empirique de la CEK, avec des résultats divers (voir par exemple Stern et al., 1996 ; Ekins, 1997 ; Heil et Selden, 1999). Richmond et Kaufmann (2006) réfutent la présence d'une quelconque relation entre pollution et croissance économique, alors que Shafik (1994) et Azomahou et al. (2006) révèlent un lien plutôt linéaire. Bien que certains travaux identifient une courbe en U inversé (Lean et Smyth, 2010b ; Saboori et al., 2012...), d'autres contributions concluent que la forme des non linéarités entre pollution et croissance peut être plus complexe que ne le suggère la CEK (par exemple Shafik, 1994, Friedl et Getzner, 2003, Ren, 2014, concluent à la présence d'une relation en N).

C'est pour tenter d'expliquer cette absence de consensus que des études plus récentes ont proposé d'amender la relation entre pollution et croissance économique, en étudiant sa sensibilité à la présence d'autres variables qui conditionnent le lien croissance-pollution. Ainsi, l'introduction des variables additionnelles est la voie la plus souvent suivie dans les travaux récents. Il peut s'agir par exemple de la consommation d'énergie (Ang, 2008,2009 ; Apergis and Payne, 2009 ; Halicioglu, 2009 ; Jalil et Mahmoud, 2009 ; Lean and Smyth, 2010 ; Arouri et al., 2012), de l'urbanisation (Zhang et Cheng, 2009 ; Hossain, 2011 ; Sharma, 2011), de la stabilité du gouvernement et la qualité des institutions (Lopez et Mitra, 2000; Dasgupta et al., 2002; Cole, 2003, 2004 ; Friedl et Getzner, 2003; Copeland et Taylor, 2004; Bernauer et Koubi, 2009; Biswas et al., 2012), du développement financier (Ozturk et Acaravci, 2013; Omri et al., 2015), des investissements directs étrangers ou encore de l'ouverture du commerce.

Sur ce dernier point, la relation commerce international/pollution appliquée à divers pays ou périodes reste ambiguë (Copeland et Taylor, 1994, 1997 ; Cole et Elliot, 2003 ; Frankel et Rose, 2005 ; Managi, Hibiki, et Tsurumi, 2009 ; Halicioglu, 2009 ; Jalil et Mahmoud, 2009 ; Nasir et Rehman, 2011 ; Jayanthakumaran et al., 2012 ; Tiwari et al., 2013 ; Ren et al., 2014 ; de Vries et Ferrarini, 2017). Les travaux d'Ang (2007) pour la France, Jalil et Mahmoud (2009) pour la Chine, Nasir et Rehman (2011) pour le Pakistan, et Omri (2013, 2015) pour les 12 pays de la région MENA tendent à montrer une courbe de type CEK en incluant la présence du commerce dans la relation environnement-croissance. D'autres auteurs réfutent la significativité de cette variable (e.g. Halicioglu, 2009 ; Ozturk et Acaravci, 2010, pour la Turquie ; Jaunky, 2010 pour 36 pays à revenu élevé ; Menyah and Wolde-Rufael, 2010, pour l'Afrique du Sud). Jalil et Mahmoud (2009) étendent la méthodologie de Halicioglu (2009) au cas de la Chine sur la période 1975-2005. Ils montrent une forme CEK avec un effet (positif mais) non significatif du commerce sur les émissions de CO₂.

A la suite de ces travaux, Jayanthakumaran et al. (2012) affirment que, sur les trois dernières décennies, les émissions de CO₂ en Chine ont été influencées par le revenu par habitant, la consommation d'énergie et les changements structurels, alors qu'un lien de causalité ne peut être établi pour l'Inde concernant les changements structurels et les émissions de CO₂. L'Inde a une économie informelle beaucoup plus importante que la Chine, elle possède en particulier un nombre élevé de micro-entreprises qui sont de faibles consommateurs d'énergie et qui ne sont pas suffisamment compétitives pour atteindre les marchés internationaux.

Un champ de recherche prend en compte les trois effets (effet d'échelle, effet de composition et effet technique) du commerce sur l'environnement. En stimulant la consommation et la production domestique, le libre-échange commercial peut entraîner une dégradation de l'environnement (effet d'échelle) (Dasgupta et al., 2002). En sens inverse, un effet technique peut suivre, dû aux efforts possibles de dépollution et au renforcement des réglementations environnementales avec le développement du commerce extérieur (Antweiler et al., 2001). L'effet de structure enfin se manifeste sur les conditions écologiques lorsque les échanges extérieurs impliquent une transformation des structures productives du pays. L'effet net du commerce sur l'environnement dépend du bilan de ces trois effets. Empiriquement, Copeland et al. (1998) ont étudié l'effet d'échelle et l'effet technique engendrés par l'échange international. Il apparaît qu'une libéralisation des échanges qui augmente l'échelle de l'activité économique de 1% accroît les concentrations de pollutions de 0,25 à 0,5 %. Cependant, l'augmentation des revenus par tête pousse ces niveaux de pollution vers le bas de 1,25 à 1,5% à travers l'effet technique.

Des recherches critiquent aussi les formes fonctionnelles utilisées et proposent des spécifications non paramétriques pour étudier la CEK. Ainsi, les résultats d'Azomahou et al. (2006) révèlent plutôt une relation monotone entre la pollution et le revenu par habitant où, d'une part, la pollution est déterminée par la consommation d'énergie, le PIB et le commerce extérieur et où, d'autre part, le revenu par habitant est aussi déterminé par les émissions de CO₂, la consommation d'énergie et le commerce extérieur.

D'autres études comme celles de Stern (2002) et Auci et Becchetti (2006) ont essayé de prendre en compte l'effet de la structure de l'économie et l'effet du progrès technique. Leurs estimations ne vérifient pas une CEK car l'impact du PIB par habitant sur les émissions de CO₂ paraît conditionné par les effets de l'industrie et de l'infrastructure d'approvisionnement en énergie.

De ces différents travaux, nous pouvons avancer que plusieurs facteurs concourent à l'évolution de la pollution et différencient les pays au-delà de leur niveau de revenu. Dès lors, la tendance à la hausse de la pollution décrite par la CEK peut ne pas être vérifiée de la même manière pour les économies à revenu faible et intermédiaire. Il apparaît que la réduction de la pollution perceptible dans les économies développées peut être largement expliquée par une transformation structurelle de leur appareil productif. De manière générale, il convient de prendre en compte d'une façon ou d'une autre le jeu combiné des effets d'échelle, des effets de structure et des effets techniques pour caractériser l'évolution du niveau de pollution. Nous proposons ainsi de tester la relation CEK en introduisant ces trois effets et tout particulièrement une variable représentative de l'effet de structure : le niveau de complexité économique.

3. MODÉLISATION ET STRATÉGIE EMPIRIQUE

3.1. Spécification du modèle et choix des variables

De manière générale, le modèle permettant de tester l'existence d'une CEK repose sur l'équation suivante :

$$CO2/tête_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Pib/tête_{it} + \alpha_2 Pib/tête_{it}^2 + \sum \delta X_{it} + \varepsilon_{it}$$

avec $CO2/tête_{it}$, la dégradation environnementale d'un pays i à l'instant t , $Pib/tête_{it}$ le PIB par habitant, X un ensemble de variables de contrôle et ε_{it} le terme d'erreur. La forme de la courbe est déterminée par les paramètres α_1 et α_2 . La relation entre $CO2/tête$ et $Pib/tête$ admet l'hypothèse d'une courbe environnementale de Kuznets si $\alpha_1 > 0$ et $\alpha_2 < 0$.

L'objectif principal de cet article consiste à rendre compte plus ou moins distinctement dans cette relation des effets d'échelle, de structure productive et des effets techniques.

Ainsi, le modèle que nous retenons se présente sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \ln CO2/tête_{it} = & \alpha_0 + \alpha_1 \ln ICE_{it} + \alpha_2 \ln(ICE)_{it}^2 + \alpha_3 \ln PIB/tête_{it} + \alpha_4 \ln Innov_{it} + \alpha_5 \ln Educ_{it} \\ & + \alpha_6 \ln Energy_{it} + \alpha_7 \ln Gov_{it} + \alpha_8 \ln Urban_{it} + \alpha_9 \ln IDE_{it} + \alpha_{10} \ln Kyoto_{it} + \alpha_{11} OMC_{it} \\ & + \beta \ln CO2/tête_{it-1} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \end{aligned}$$

Le modèle est estimé sur un échantillon de 133 pays² qui couvre une période de 31 années (1984-2014). La définition précise des variables est donnée dans le tableau 1³.

² Données en Annexe 7.

³ Les statistiques descriptives de ces variables sont données en Annexe 6.

Tableau 1. Définition des variables

Indicateurs	Description	Source
<i>CO2/tête</i>	Emissions de CO2 (en tonnes métriques) par habitant	WDI (2016)
<i>ICE</i>	Indice de complexité économique (Hidalgo et al, 2007)	Observatoire de la complexité économique du MIT (2016)
<i>PIB/tête</i>	Pib par habitant en dollars courants	WDI (2015)
<i>Innov</i>	Indice de création technologique composé de : (i) nombre de brevets déposés pour 1 million de personnes; (ii) nombre de publications dans une revue scientifique pour un million de personnes	http://lead.univ-tln.fr World Intellectual Property Organization, (WDI, 2016)
<i>Educ</i>	Dépenses publiques en éducation en % du PIB	WDI, (2016)
<i>Energy</i>	Consommation d'énergie par habitant	WDI (2015)
<i>Gouv</i>	Indice de stabilité du gouvernement	PRS-ICRG (2014)
<i>Urban</i>	Population urbaine en % de la population totale	WDI (2015)
<i>IDE</i>	Investissements directs étrangers, entrées nettes en % du PIB	WDI (2016)

La variable expliquée *CO2/tête_{it}* correspond aux émissions de CO2 par habitant d'un pays *i* à l'année *t*. Le rapport au nombre d'habitants permet de corriger l'effet dû à la taille des populations des pays considérés. Le choix de cette variable a été validé par de nombreux travaux pour des polluants comme les émissions de dioxyde de carbone ou encore de dioxyde de soufre (Shafik et al., 1992 ; Kaufmann et al., 1998 ; Meunié, 2004).

Concernant les variables explicatives, *ICE*, le niveau de complexité économique d'un pays, traduit l'effet de structure ; *PIB/tête*, le revenu par habitant, traduit l'effet d'échelle ; *Innov* et *Educ* traduisent d'une certaine manière les effets techniques ; *Gouv*, *Urban*, *IDE* sont des variables de contrôle ; *Kyoto* et *OMC* des variables dummies ; μ_i les éventuels effets fixes ; γ_t les effets temporels et ε_{it} les erreurs de spécification.

Le PIB par habitant (en dollars courants) *PIB/tête* est habituellement retenu dans la plupart des travaux s'intéressant à la courbe en U inversé. Cette variable traduit principalement l'effet d'échelle. Un signe positif est attendu dans la mesure où pour la plupart des pays, les autres effets donnés, la croissance du revenu par habitant implique une dégradation de l'environnement.

L'indice de complexité économique *ICE* (Hausmann et al., 2007. Hidalgo et al., 2009 ; Poncet et al., 2013) est un indicateur utilisé pour rendre compte des déterminants économiques du commerce (les dotations d'une économie en facteur travail, capital et technologique) (voir Annexe 2). Il paraît pouvoir être pertinent ici pour caractériser les structures productives d'une économie. *ICE* intervient dans le modèle comme une variable complémentaire au revenu par habitant. Une question peut cependant être posée sur la pertinence de cette variable : la matrice de corrélation (Annexe 3a) indique une corrélation sensible ($R = 0,598$) entre *ICE* et le *PIB/tête* en prenant en compte l'ensemble des 133 pays sur la période 1984-2014. Le graphique donné en Annexe 4 montre que si les deux variables *ICE* et *PIB/tête* présentent des valeurs moyennes croissantes en allant des pays à faible revenu vers les pays à revenu intermédiaire puis vers les pays à revenu élevé, une corrélation significative n'apparaît entre elles que dans le groupe des pays développés. Il y a peu de corrélation au sein du groupe de pays à revenu intermédiaire ($R = 0,25$) sinon aucune dans le groupe des pays à revenu faible ($R = 0,05$). Cela justifie, malgré la corrélation apparemment importante, le choix de cette variable en complément du PIB par tête.

Nous considérons des variables *proxies* des effets techniques pouvant amener la production ou l'utilisation de produits moins polluants : la création technologique **Innov**⁴ et les dépenses publiques d'éducation **Educ** (signe négatif attendu).

Par ailleurs, nous introduisons une variable de contrôle institutionnelle telle que la stabilité du gouvernement **Gouv** (signe négatif attendu) dont le rôle a été montré dans la littérature en matière d'effet à long terme sur l'environnement et la conservation des ressources naturelles.

D'autres variables de contrôle sont également prises en compte telles que le taux d'urbanisation (population urbaine en % de la population totale) **Urban** (signe positif attendu) et la consommation d'énergie par habitant **Energy**, dont la littérature montre une incidence sur la dégradation de l'environnement, au-delà même de sa corrélation avec le PIB par tête ($R = 0,73$, voir Annexe 3a).

L'effet sur l'environnement de l'investissement direct étranger (**IDE**) a été souligné à plusieurs reprises. Cette variable peut avoir, selon la littérature, des effets contraires. D'une part, des IDE peuvent permettre une amélioration de la qualité de l'environnement en apportant des technologies modernes (Birdsall et Wheeler, 1993 ; Esty et Gentry, 1997 ; Gentry, 1998). D'autre part, l'IDE peut reposer sur la délocalisation des firmes multinationales très polluantes, ce qui implique une dégradation de l'environnement notamment chez les pays à faible revenu.

D'autres variables peuvent en outre être considérées. Par exemple, O'Connor (1994) a pris en considération les mesures prises par les pouvoirs publics, essentiellement les réglementations environnementales. Dans cet esprit, nous introduisons deux variables muettes : l'effet sur les émissions de CO₂ de l'entrée en vigueur du protocole de Kyoto (**Kyoto**, de valeur 1, sinon 0, signe négatif attendu) et de l'impact de l'OMC (**OMC**, 1 pour les pays membres de l'OMC et 0 sinon, signe négatif attendu). Les économies des pays signataires des conventions internationales sur l'environnement telles que la convention de Stockholm sur les organiques persistants polluants ont eu un effet déterminant dans la préservation de l'environnement. Très peu d'études prennent en compte ces effets.

3.2. Procédure d'estimation

Le choix des variables et de la régression a été déterminé à partir du modèle de base de Grossman et Krueger (1991). Le modèle empirique a été ajusté et vérifié par le test VIF (annexe 3b) afin d'éliminer un éventuel biais de multicollinéarité entre des variables explicatives suggéré par la matrice de corrélation⁵.

Nous jugeons des biais d'autocorrélation, d'hétéroscédasticité et d'endogénéité pouvant apparaître dans l'échantillon, dans le modèle à forme quadratique. Le test de Wooldridge pour l'autocorrélation sur des données de panel indique une absence de corrélation de premier ordre. L'hétéroscédasticité est vérifiée par le test de Breusch et Pagan⁶. L'hypothèse de présence d'effets aléatoires ne peut pas être rejetée et donc l'estimateur GLS paraît plus requis que celui des MCO. D'ailleurs, les résultats du test d'Hausman nous indiquant que la probabilité du test est supérieure au seuil de 10 %, l'hypothèse H₀ ne peut être rejetée. Nous devons

⁴ A défaut de variables pouvant directement représenter l'utilisation de biens plus écologiques. Les données statistiques qui peuvent être mobilisées pour capter l'ensemble des innovations écologiques, comme par exemple les dépenses de protection de l'environnement ou encore la production primaire d'énergies renouvelables, concernent un échantillon très restreint de pays.

⁵ Les résultats du VIF sont bien inférieurs à la limite supérieure de 10 (2, 35), ce qui indique que le problème de multicollinéarité est mineur dans nos spécifications.

⁶ Le test BP nous indique une hétéroscédasticité importante et significative de l'ordre de 675,6 pour l'échantillon global.

donc privilégier l'adoption d'un modèle à effets aléatoires et retenir l'estimateur GLS⁷. Une telle méthode d'estimation paraît ainsi plus appropriée qu'une estimation à effets fixes, sous l'hypothèse que le terme d'efficience ne soit pas corrélé avec les régresseurs afin d'obtenir le meilleur estimateur linéaire non biaisé.

Mais, concernant l'estimation dynamique, la présence de la variable explicative retardée ($\ln\text{CO}_2/\text{tete}_{it-1}$) est considérée comme une source d'endogénéité – justifiée par la présence d'autocorrélation – rendant l'estimateur GLS inefficace (Baltagi, 1995). Ainsi, le recours à l'estimateur dynamique GMM en Système de Blundell et Bond (1998) avec une spécification de variance robuste pour l'autocorrélation est plus adapté pour traiter à la fois les différents biais cités précédemment mais aussi pour résoudre les problèmes de biais de causalité inverse et de simultanéité.

L'estimateur GMM va contrôler les caractéristiques des pays non observées in-variables et capturer l'impact des changements des variables dans le temps. Afin de garantir la cohérence de cet estimateur construit selon la Méthode des Moments Généralisés, nous avons vérifié l'absence d'autocorrélation moyenne dans les résidus de second ordre pour toutes les estimations.

Les résultats des estimations présentés dans le tableau 2 ont fait l'objet de tests de sensibilité en utilisant des estimateurs alternatifs (GLS et GMM) selon les variables explicatives introduites ainsi que les variables muettes (OMC et Kyoto) et les variables d'interactions ($\log\text{ICE}^*\text{High/Middle/Low}$). Les tests⁸ et estimateurs utilisés mettent en évidence la robustesse des résultats : le passage d'un estimateur à un autre n'a pas créé d'instabilité significative dans le signe et la valeur des coefficients estimés.

4. RÉSULTATS DU MODÈLE : L'EFFET SELON UNE COURBE EN U DE LA COMPLEXITÉ ÉCONOMIQUE SUR LA POLLUTION DE L'AIR

4.1. Analyse globale

Les résultats économétriques donnés dans le tableau 2 nous indiquent que les coefficients estimés relatifs aux trois grands effets considérés sont statistiquement significatifs et leurs signes positifs sont conformes à ceux anticipés.

Le coefficient de la variable ICE relatif à l'effet de composition indique un effet positif et statistiquement significatif sur la pollution (1,25) dans les premiers stades de transformation structurelle et cette tendance décroît à partir d'un certain seuil donné par ICE^2 (-0,9). A plus long terme le coefficient associé à l'ICE est significativement plus faible dans la première phase (0,9) puis décroît dans la seconde (-0,25). En revanche, si l'effet n'est pas établi sur la période 1984-2000 (colonne 3), nous observons un effet significativement plus important sur la période 2000-2014 avec un coefficient de 0,7 puis de -0,19 (colonne 4). Ainsi, l'intensité en pollution augmente et s'inverse au-delà d'un certain seuil de complexité, comme cela peut être observé globalement dans le graphique donné en annexe 5⁹. Ce résultat permet d'avancer en la matière l'existence d'une CEK dont le point de retournement¹⁰ se situerait à un niveau de complexité économique de 0,70 à court

⁷ Les effets individuels et les variables explicatives ne sont pas systématiquement reliés, de sorte que l'estimateur à effets aléatoires est plus adapté à notre modèle.

⁸ Test d'hétéroscédasticité, d'hétérogénéité, d'endogénéité concernant la version statique, et le test de Sargan pour la version dynamique.

⁹ La présence d'une fonction cubique a également été testée. Le signe de la variable ICE^3 est significativement le même que la variable mise au carré, ce qui conforte l'hypothèse d'une courbe en U inversé et qu'il n'apparaît pas un autre point de retournement.

¹⁰ Le point de retournement de ICE se calcule comme suit : $-\text{ICE}/(2*\text{ICE}^2)$. Le point de retournement correspondant de $\text{CO}_2/\text{tête}$ se calcule comme suit : $\text{ICE} (-\text{ICE}/2\text{ICE}^2) + \text{ICE}^2 (-\text{ICE}/2\text{ICE}^2)$.

terme et de 1,8 à plus long terme correspondant au seuil maximal que les pays peuvent atteindre dans les conditions actuelles. L'augmentation de ce seuil s'explique du fait que les économies en croissance essaient de devenir progressivement plus écologiques.

Concernant les effets d'échelle, il apparaît qu'une augmentation de 1% du revenu par habitant génère une hausse de 0,52% des émissions de CO2 par habitant à court terme (colonne 2 du tableau 2). A plus long terme le coefficient associé au revenu par habitant est significativement plus faible (0,07%).

Tableau 2. Estimation du modèle pour les 133 pays

Variable dépendante	(1)	(2)	(3)	(4)
lnCO2/tête	GLS	GMM	GMM	GMM
Période	1984-2014	1984-2014	1984-2000	2000-2014
lnCO2/tête _{t-1}		0.728*** (0.0104)	0.755*** (0.0191)	0.616*** (0.0146)
lnICE	1.248*** (0.0864)	0.916* (0.0246)	0.0419 (0.0446)	0.723** (0.0438)
lnICE ²	-0.897*** (0.121)	-0.257* (0.0525)	0.00727 (0.0735)	-0.187** (0.0765)
lnPIB/tête	0.529*** (0.0143)	0.0691*** (0.00697)	0.0904*** (0.0185)	0.0374*** (0.00830)
lnInnov	-2.610*** (0.142)	-0.353*** (0.101)	-0.609*** (0.233)	-0.893*** (0.165)
lnEduc	-0.00604 (0.0178)	-0.0304*** (0.00769)	0.0305*** (0.0106)	-0.0121* (0.0125)
lnEnergy	0.452*** (0.0115)	0.147*** (0.0145)	0.116*** (0.0235)	0.291*** (0.0223)
lnGouv	-0.0902** (0.0442)	-0.0454*** (0.0146)	-0.0743*** (0.0173)	-1.261*** (0.387)
lnUrban	0.553*** (0.0310)	0.298*** (0.0304)	0.277*** (0.0532)	0.376*** (0.0504)
lnIDE	-0.000315 (0.00196)	0.000702 (0.000663)	0.00439*** (0.00108)	-0.00239*** (0.000848)
Kyoto	-0.00413 (0.0143)	-0.0127*** (0.00401)	-0.00859 (0.00577)	-0.192*** (0.0553)
OMC	-0.152*** (0.0130)	0.00184 (0.00524)	0.00316 (0.00662)	-0.0316** (0.0140)
Constante	-3.933*** (0.0581)	-0.958*** (0.0536)	-1.012*** (0.0974)	-2.901*** (0.496)
Point de retournement de ICE	0.70	1.8	n.s.	2
Point de retournement de CO2/tête	0.43	0.81	n.s.	0.72
Observations	4123	3990	2128	1995
Number of id	133	133	133	133
Overall R-sq	0.78			
Llikelihood	-635.8			
AR(2) p-value		0.914	0.705	0.591
Sargan p-value		0.754	0.564	0.433

Ecart-type entre parenthèses. *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$.

GLS : Moindre Carrés Généralisés. GMM : Méthode des moments généralisés. Le test de Sargan est la statistique du test de validité des instruments, avec la p-value. AR(2) : statistique d'Arellano-Bond du test d'autocorrélation des erreurs respectivement de second ordre avec la p-value ; Trois instruments retenus, PIB/tête, Innov et Educ, par leur retard d'ordre (2).

Concernant les effets techniques, les résultats montrent une relation négative et significative à long terme de l'innovation (-0,3%) ainsi que des dépenses d'éducation (-0,03%) sur la quantité des émissions de CO2/tête, avec un effet si-

gnificativement plus important à court terme pour l'innovation (-2,6%). Ces résultats soutiennent ainsi l'idée que les effets techniques peuvent dépendre des dépenses accordées au système éducatif et au développement du capital humain et de l'innovation, à travers une meilleure prise de conscience des enjeux au sujet des questions environnementales.

Par ailleurs, une augmentation de 1% de la consommation d'énergie par habitant conduit à une hausse de 0,4% des émissions de CO₂ par habitant contre à 0,14% à plus long terme, corroborant les travaux récents. L'accroissement des émissions de CO₂/tête est également déterminé par le taux d'urbanisation : une augmentation de 1% de cet indicateur génère à court terme une hausse de 0,55% des émissions de CO₂ par habitant.

La stabilité politique joue un rôle significatif dans cette relation. Elle tend à amener une réduction de 0,04% des émissions de CO₂ par habitant à long terme (colonne 2) avec un effet négatif plus important sur la période 2000-2014 (-1,2%).

Les investissements directs étrangers tendent à dégrader l'environnement (coefficient positif et significatif), certainement liés à la délocalisation des activités polluantes vers des pays peu développés. Toutefois, cet effet n'est significatif que sur la période 1984-2000 (colonne 5). Dans la période 2000-2014, l'effet tend à s'inverser avec l'apparition d'un coefficient négatif et significatif, ce qui amène à penser que les IDE tendent à changer de nature et à agir sur le niveau d'émission de CO₂ en associant des technologies plus écologiques.

Par ailleurs, les estimations révèlent l'effet significatif de l'entrée en vigueur du protocole de Kyoto (-0,012%) ainsi qu'un effet plus important encore de l'engagement des membres de l'OMC en faveur du développement durable et de l'environnement (-0,15%). Ce résultat s'explique par des règles et des clauses de protection environnementales renforcées impliquant une réduction de la quantité des émissions de CO₂.

Enfin, il ressort l'importante présence du phénomène d'hystérèse à travers l'effet positif et significatif de la variable retardée (0,75%) sur les émissions de CO₂/tête. Ceci indique que les émissions de CO₂ par habitant correspondent à un processus largement dépendant des conditions passées avec le jeu progressif dans le temps des variables explicatives.

4.2. Analyse selon le niveau de revenu des pays

Pour montrer que la relation en U inversé entre la complexité économique et la pollution de l'air peut être spécifique à certains groupes de pays, nous reprenons le modèle sur la période 1984-2014¹¹ en séparant dans l'ensemble de l'échantillon les pays à revenu élevé (High), intermédiaire (Middle) et faible (Low), selon les catégories de pays retenues par la Banque mondiale (voir Annexe 7).

Les résultats du tableau 3 révèlent l'effet très significatif du revenu par habitant sur les émissions de CO₂ par habitant dans les pays à revenu élevé (0,045), à revenu intermédiaire (0,048) et à revenu faible (0,046). Ces résultats confortent l'hypothèse d'un effet d'échelle où la croissance de l'activité économique engendre l'accroissement des émissions de polluants.

Le coefficient associé à la complexité économique est important, significatif et positif dans les premiers stades puis devient négatif pour les pays à revenu élevé (0,7 puis -0,16)¹² à partir d'un certain seuil dont le point de retournement est à un

¹¹ Les sous-périodes 1984-2000 et 2000-2014 n'ont pas été considérées du fait de la non-significativité des coefficients des variables d'intérêt.

¹² Valeur des coefficients à court terme. L'effet de ICE dans les pays à revenu élevé est calculé par la somme ($\ln ICE + \ln ICE * High$) puis dans la seconde phase par la somme ($\ln ICE + \ln ICE * High^2$).

niveau de complexité économique de 2,18. Ce seuil qui montre une relation en U inversé nous indique d'une certaine manière que la pollution augmente dans les premiers stades de transformation structurelle puis tend à diminuer à partir de ce seuil de complexité économique. Les pays à revenu élevé, dotés de spécialisations dans des domaines complexes, vont ainsi relativement moins polluer dans les années à venir alors que d'autres pays vont encore augmenter leur pollution du fait d'une structure productive moins complexe.

Tableau 3. Estimation du modèle par groupe de pays selon leur revenu par habitant, 1984-2014

Période 1984-2014 lnCO2/tête	(1) GMM	(2) GMM	(3) GMM
lnCO2/tete _{t-1}	0.656*** (0.0122)	0.727*** (0.0108)	0.742*** (0.0111)
lnICE	0.453* (0.0340)	0.0436 (0.0618)	0.808** (0.0398)
lnICE ²	-0.123* (0.0629)	-0.0394 (0.106)	-0.143** (0.0685)
lnPIB/tête	0.0449*** (0.00802)	0.0483*** (0.00742)	0.0462*** (0.00822)
lnInnov	-0.472*** (0.0829)	-0.550*** (0.137)	-0.485*** (0.159)
lnEduc	-0.0146** (0.00742)	0.0143* (0.00760)	0.0212*** (0.00808)
lnEnergy	0.248*** (0.0168)	0.133*** (0.0160)	0.173*** (0.0153)
lnGouv	-0.0380** (0.0177)	-0.0144 (0.0163)	-0.0798*** (0.0170)
lnUrban	0.125*** (0.0263)	0.267*** (0.0328)	0.321*** (0.0300)
lnIDE	0.00155** (0.000638)	0.000515 (0.000659)	0.00192*** (0.000702)
Kyoto	-0.0194*** (0.00461)	-0.0105** (0.00439)	-0.0148*** (0.00451)
OMC	0.00519 (0.00558)	-0.0109* (0.00563)	-0.00290 (0.00587)
lnICE*HIGH	0.247*** (0.0864)		
lnICE ² *HIGH	-0.0461*** (0.128)		
lnICE*MIDDLE		0.00381 (0.0677)	
lnICE ² *MIDDLE		0.0502 (0.122)	
lnICE*LOW			-0.206*** (0.0619)
lnICE ² *LOW			0.275** (0.120)
Constante	-0.983*** (0.0556)	-0.926*** (0.0573)	-1.056*** (0.0594)
Point de retournement de ICE	2.18	n.s.	2.38
Observations	3990	3990	3990
Number of id	133	133	133
AR(2) p-value	0.921	0.915	0.928
Sargan p-value	0.624	0.65	0.71

*Ecart-type entre parenthèses. *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$.*

Colonnes : (1) Pays à revenu élevé, (2) Pays à revenu intermédiaire, (3) Pays à revenu faible.

Une courbe en U apparaît dans les pays à revenu faible (composés principalement de pays africains), c'est-à-dire pour les pays qui sont positionnés au début de la première phase de la courbe (-0,62 puis 0,13). Ce résultat peut être expliqué lors du développement industriel par leur mode de croissance plus basé sur des activités extractives et polluantes associé à des politiques environnementales ou à des mesures de contrôle de pollution moins contraignantes.

Le budget consacré à l'éducation a un effet significatif dans la baisse des émissions de CO₂ par habitant pour les pays à revenu élevé (-0,01), ce qui n'est pas le cas des pays à revenu faible (0,02) et sans véritable effet dans les pays à revenu intermédiaire, laissant apparaître un manque de sensibilité aux enjeux environnementaux. La création technologique par contre a un effet très important dans la baisse des émissions de CO₂ par habitant dans tous les groupes de pays et particulièrement dans les pays à revenu intermédiaire (où le coefficient est élevé, -0,55).

L'entrée en vigueur du protocole de Kyoto joue un rôle significatif à long terme dans la réduction d'émission de gaz à effet de serre, les coefficients sont négatifs et similaires dans toutes les régions du monde. L'adhésion à l'OMC a eu notamment un effet significatif dans la réduction des émissions de CO₂ par habitant dans les pays à revenu intermédiaire (-0,01).

Les effets sur la pollution liés à la consommation d'énergie par habitant et au développement de l'urbanisation sont très élevés et significatifs dans toutes les régions du monde. L'effet significativement positif des IDE sur les émissions de polluants laisse apparaître sur l'ensemble de la période que l'attractivité des IDE, particulièrement pour les pays à faible revenu, n'offre pas d'amélioration de la qualité de l'environnement.

4.3. Comparaison avec le modèle CEK estimé avec PIB/tête et PIB/tête²

Nos résultats nous laissent penser que l'accroissement de la complexité économique permettrait d'atteindre plus rapidement le seuil de retournement du niveau de pollution que l'accroissement du PIB/tête. Pour vérifier cela, nous procédons à une estimation du modèle CEK en prenant les variables habituelles PIB/tête et PIB/tête² avec ICE, afin de le comparer aux résultats de notre modèle CEK retenu depuis avec ICE, ICE² et PIB/tête.

L'estimation de ce modèle donnée au tableau 4 montre un effet important, significatif et positif du PIB/tête sur les émissions de CO₂ par habitant dans la première phase de croissance puis cet effet devient négatif dans une seconde phase, permettant de vérifier en la matière l'existence d'une CEK traditionnelle dont le point de retournement se situerait à un niveau de revenu par habitant de 4,97 à court terme et de 4,28 à plus long terme.

Le coefficient associé à la complexité économique est significativement négatif particulièrement à court terme (-0,54). De même pour les effets techniques, les résultats montrent une relation négative et significative à court terme de l'innovation (-1,9%) ainsi que des dépenses d'éducation (-0,05%) sur la quantité des émissions de CO₂/tête.

A partir des estimations par les GMM effectuées sur l'ensemble des pays considérés entre 1984 et 2014, nous avons consigné dans le tableau 5 le seuil de retournement du CO₂/tête selon le modèle estimé avec le PIB/tête et le PIB/tête², et celui obtenu d'après le modèle prenant pour variables ICE et ICE².

Il apparaît nettement que le point de retournement de la pollution dépendant du modèle estimé avec le PIB/tête est plus élevé (2,41) que le seuil lié à l'indicateur de complexité économique ICE (2,24) donné dans le modèle précédemment estimé au paragraphe 4.1, et que l'on peut discerner graphiquement dans l'annexe 5. Nous pouvons en déduire que l'accroissement de la complexité économique permet plus rapidement d'atteindre le seuil de retournement du niveau de pollution que l'accroissement du PIB/tête. Ce résultat laisse apparaître que pour réduire la pollution, le mode de croissance et les spécialisations productives sont plus importants que la croissance elle-même et le niveau de développement économique atteint.

Tableau 4. Estimation du modèle CEK avec PIB/tête et PIB/tête²

Variable dépendante	(1)
lnCO2/tête	GMM
Période	1984-2014
lnCO2/tête _{t-1}	0.541*** (0.0142)
lnPIB/tête	0.428*** (0.0439)
lnPIB/tête ²	-0.0515*** (0.00615)
lnICE	-0.0161* (0.0223)
lnInnov	0.0787 (0.185)
lnEduc	0.00615 (0.00808)
lnEnergy	0.264*** (0.0218)
lnGouv	-0.0467** (0.0198)
lnUrban	0.224*** (0.0402)
lnIDE	0.00117* (0.000679)
Kyoto	-0.0255*** (0.00512)
OMC	-0.0193*** (0.00657)
Constante	-1.798*** (0.0931)
Point de retournement du PIB/tête	4.28
Point de retournement du CO2/tête	0,88
Observations	3990
Number of id	133
AR(2) p-value	0.805
Sargan p-value	0.769

Ecart-type entre parenthèses. *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$.

Tableau 5. Seuils de retournement selon le modèle estimé sur la période 1984-2014

	Point de retournement	
	Modèle estimé avec PIB/tête	Modèle estimé avec ICE
Emissions de CO2 (en tonnes métriques) par habitant	2,41	2,24

5. CONCLUSION

L'objectif de cet article a été d'analyser l'effet de l'indicateur de complexité économique (ICE) sur le niveau de pollution de l'air permettant de considérer l'évolution de la structure productive comme un élément central du modèle CEK, au-delà du seul PIB par habitant. Il se dessine, en estimant le modèle sur un échantillon de 133 pays sur la période 1984-2014, une relation en U inversé entre ICE et pollution. L'intensité de pollution par habitant est plus prononcée dans les pre-

miers stades de transformation structurelle, puis s'amoin-drit au-delà d'un certain seuil avec la complexification du tissu productif.

Outre l'effet de structure, nous caractérisons l'effet d'échelle (PIB/tête) et l'effet technique (variables Innov et Educ) sur la pollution de l'air. L'effet d'échelle traduit le fait que la croissance économique implique, avec l'augmentation des quantités produites et à technologie donnée, un accroissement des pollutions émises. L'effet technique fait apparaître que la croissance peut devenir moins polluante avec la maîtrise de nouvelles technologies et les efforts en matière d'éducation.

Nous avons aussi testé le modèle par groupe de pays selon leur niveau de revenu. Nos résultats montrent que les trajectoires peuvent différer selon ICE, notamment au sein des pays à revenu intermédiaire et des pays à revenu faible.

Les résultats obtenus nous interpellent sur l'influence qu'a l'ICE par rapport au PIB/tête sur la courbe en U inversé. Ils nous amènent à penser que la diminution relative de la pollution à partir d'un certain seuil est plus le résultat d'une profonde transformation structurelle que de l'effet du niveau de développement. Pour cela, nous avons comparé le modèle CEK en considérant respectivement comme variables explicatives PIB/tête avec ICE et ICE² et ICE avec PIB/tête et PIB/tête². Les estimations révèlent que le seuil de retournement de la pollution dépendant du PIB/tête est plus élevé que le seuil lié à l'indicateur de complexité économique ICE. En d'autres termes, l'accroissement de la complexité économique permet plus rapidement d'atteindre le seuil de retournement du niveau de pollution que l'accroissement du PIB par tête. Ce résultat laisse apparaître que pour réduire la pollution, le mode de croissance et les spécialisations productives d'un pays sont plus importants que la croissance elle-même et le niveau de développement économique atteint.

REFERENCES

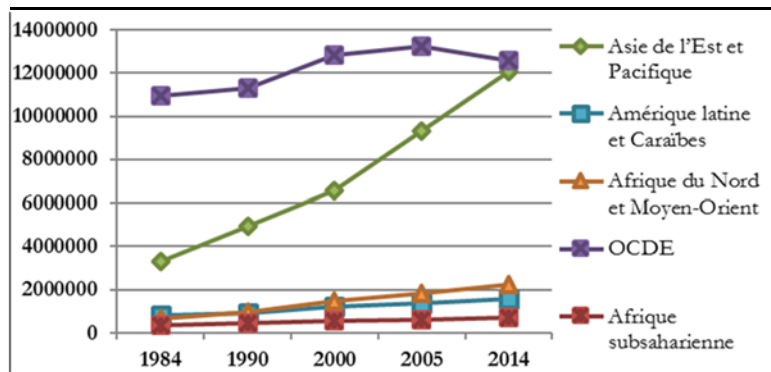
- Apergis, N., Payne, J.E.**, 2009b. Energy consumption and economic growth: evidence from the commonwealth of independent states. *Energy Economics* 31, 641–647.
- Ang, J.B.**, 2009. CO2 emissions, research and technology transfer in China. *Ecological Economics* 68, 2658–2665.
- Ang, J.B.**, 2008. Economic development, pollutant emissions and energy consumption in Malaysia. *J. Policy Model* 30, 271–278.
- Antweiler, W., Copeland, B.R., Taylor, M.S.**, 2001. Is free trade good for the environment? *American Economic Review* 91, 4, 877–908.
- Arouri, M.H., Ben Youssef, A., M'henni, H., Rault, C.**, 2012. Energy consumption, economic growth and CO2 emissions in Middle East and North African countries. *Energy Policy* 45, 342–349.
- Auci, Becchetti**, 2005. The Stability of the Adjusted and Unadjusted Environmental Kuznets Curve, Working Papers 2005.93, Fondazione Eni Enrico Mattei.
- Azomahou, T., Laisney, F., Van, P.N.**, 2006. Economic development and CO2 emissions: a non-parametric panel approach. *Journal of Public Economics* 90, 1347–1363.
- Baltagi, B.H.**, 1995a. Editor's introduction: panel data. *Journal of Econometrics* 68, 1-4
- Bernauer, Koubi**, 2009. Political Determinants of Environmental Quality. *Ecological Economics*, 68, 5, 1355-1365.
- Birdsall, N., Wheeler, D.**, 1993. Trade policy and industrial pollution in Latin America: Where are the pollution havens? *Journal of Environment and Development* 2, 137–149.
- Biswas, A.K., Farzanegan M.R., Thum, M.**, 2012. Pollution, shadow economy and corruption: Theory and evidence. *Ecological Economics* 75, 114–125.
- Cole, M.A.**, 2004. Trade, the pollution haven hypothesis and the environmental Kuznets curve: examining the linkages. *Ecological Economics* 48, 71–81.

- Cole, M.A., Elliott, R.J.R.**, 2003. Determining the trade-environment composition effect: the role of capital, labor and environmental regulations. *Journal of Environmental Economics and Management* 46, 3, 363–383.
- Copeland, B.R., Taylor, M.S.**, 2004. Trade, Growth, and the Environment. *Journal of Economic Literature*, 42, 1, 7-71
- Copeland, B.R., Taylor, M.S.**, 1997. A Simple Model of Trade, Capital Mobility and the Environment, NBER, No. 5898, Cambridge, MA.
- Copeland, B.R., Taylor, M.S.**, 1994. North-south trade and the environment. *Quarterly Journal of Economics* 109 (3), 755–787.
- Dasgupta, S., Laplante, B., Wang H., Wheeler, D.**, 2002. Confronting the Environmental Kuznets Curve *The Journal of Economic Perspectives*, 16, 1, 147-168.
- de Vries J., Ferrarini, B.**, 2017. What Accounts for the Growth of Carbon Dioxide Emissions in Advanced and Emerging Economies? The Role of Consumption, Technology and Global Supply Chain Participation. *Ecological Economics* 132, 2, 213-223.
- Esty, D., Gentry, B.**, 1997. Foreign Investment, Globalisation, and Environment, in T. Jones, ed., *Globalisation and Environment*. OECD, Paris.
- Ekins, P.**, 1997. The Kuznets curve for the environment and economic growth: examining the evidence. *Environment Plan. A* 29, 805–830.
- Frankel, F., Rose A.**, 2005. Is Trade Good or Bad for the Environment? Sorting Out the Causality, *The Review of Economics and Statistics*, 87, 1, 85-91.
- Friedl, B., Getzner, M.**, 2003. Determinants of CO2 emissions in a small open economy, *Ecological Economics*, 45, 133–148.
- Gentry, B. (ed.)**, 1998a. *Private Capital Flows and the Environment: Lessons from Latin America*. Edward Elgar Press, Cheltenham, UK.
- Gentry, B.**, 1998b. Avoiding Environmental 'Disasters' in Joint Ventures, Pacific Basin Economic Council/World Bank Roundtable on "Expanding Public-Private Partnerships: Economic Competitiveness and Environmental Concerns in the Asia-Pacific Region." Hong Kong.
- Gentry, B.**, 1998c. Encouraging Public-Private Regulatory Dialogue, PBEC/World Bank Roundtable, Hong Kong.
- Grossman, G.**, 1995. Pollution and growth: What do we know? In: Goldin and Winter (Eds.), *The Economics of Sustainable Development*, Cambridge University Press.
- Grossman, G., Krueger, A.**, 1994. Economic Growth and The Environment. NBER, Working Paper No. 4634.
- Grossman, G., Krueger, A.**, 1991. Environmental impacts of a North American free trade agreement. NBER Working Paper, No. 3194.
- Halicioglu, F.**, 2009. An econometric study of CO2 emissions, energy consumption, income and foreign trade in Turkey. *Energy Policy* 37, 1156–1164.
- Hausmann, R., Hwang, J., Rodrik, D.** 2007. What you export matters. *Journal of Economic Growth* 12, 1, 1–25.
- Hausmann, R., Hidalgo, C.** 2011. The network structure of economic output. *Journal of Economic Growth* 16, 309–342.
- Heil, M.T., Selden, T.**, 2001. Carbon emissions and economic development: future trajectories based on historical experience, *Environment and Development Economics*, 6, 1, 63-83.
- Hidalgo, C.** 2009. The dynamics of economic complexity and the product space over a 42 year period. Working Paper No. 189. Cambridge, MA: Center for International Development, Harvard University.
- Hidalgo, C., Hausmann, R.** 2009. The building blocks of economic complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, 26, 10570–10575.
- Hossain, M.S.**, 2011. Panel estimation for CO2 emissions, energy consumption, economic growth, trade openness and urbanization of newly industrialized countries. *Energy Policy* 39, 6991–6999.
- Jalil, A., Mahmud, S.F.**, 2009. Environment Kuznets curve for CO2 emissions: a cointegration analysis for China. *Energy Policy* 37, 5167–5172.
- Jaunky, V.C.**, 2010. The CO2 Emissions-Income Nexus: Evidence from Rich Countries. Faculty of Social Studies and Humanities. Department of Economics and Statistics. University of Mauritius.

- Jayanthakumaran, K., Verma, R., Liu, Y.**, 2012. CO2 emissions, energy consumption, trade and income: a comparative analysis of China and India. *Energy Policy* 42, 450–460.
- Kaufmann, R.K., Davidsdottir, B., Garnham, S., Pauly, P.**, 1998. The determinants of atmospheric SO2 concentrations: reconsidering the environmental Kuznets curve. *Ecological Economics* 25, 2, 209–220.
- Kuznets, S.**, 1955. Economic growth and income inequality. *American Economic Review* 49, 1-28.
- Lean H.H., Smyth, R.**, 2010. CO2 emissions, electricity consumption and output in ASEAN. *Applied Energy* 87, 1858-1864.
- Lopez, Mitra**, 2000. Corruption, Pollution, and the Kuznets Environment Curve. *Journal of Environmental Economics and Management* 40, 137-150.
- Managi, S., Hibiki, A., Tsurumi, T.**, 2009. Does trade openness improve environmental quality? *Journal of Environment Economics Management*. 58, 346–363.
- Meunié, A.**, 2004. Les controverses autour de la courbe environnementales de Kuznets, Document de travail. Centre d'économie du développement, Université Montesquieu Bordeaux 4
- Menyah, K., Nazlioglu, S., Wolde-Rufael, Y.**, 2014. Financial development, trade openness and economic growth in African countries: new insights from a panel causality approach. *Economics Model.* 37, 386–394.
- Nasir, M., Rehman, F.U.** 2011. Environmental Kuznets curve for carbon emissions in Pakistan: An empirical investigation. *Energy Policy*, 39, 1857-1864.
- O'Connor, D.**, 1994. Managing the Environment with Rapid Industrialization : Lessons from the East Asian Experience., OCDE, Paris
- Omri, A.**, 2015. Financial development, environmental quality, trade and economic growth: What causes what in MENA countries. *Energy Economics* 48, 242–252
- Ozturk, I., Acaravci, A.**, 2010. CO2 emissions, energy consumption and economic growth in Turkey. *Renewable Sustainable Energy Review* 14, 3220–3225.
- Ozturk, I., Acaravci, A.**, 2013. The long-run and causal analysis of energy, growth, openness and financial development on carbon emissions in Turkey. *Energy Economics* 36, 262–267.
- Panayotou, T.**, 2003. Economic development and the Environment. Working paper, Harvard University and Cyprus International Institute of Management.
- Panayotou, T.**, 1993. Empirical Tests and Policy Analysis of Environmental Degradation at Different Stages of Economic Development. Working Paper WP238, Technology and Employment Programme, International Labour Office, Geneva.
- Poncet, S., DE Waldemar, M.** 2013. Export Upgrading and Growth: The Prerequisite of Domestic Embeddedness. *World Development* 51, 104–118.
- Ren, S., Baolong, Y., Ma, X., Chen, X.**, 2014. The impact of international trade on China's industrial carbon emissions since its entry into WTO. *Energy Policy* 69, 624-634.
- Richmond, K., Kaufmann, R.**, 2006. Is there a turning point in the relationship between income and energy use and/or carbon emissions? *Ecological Economics*, 56, 2, 176-189.
- Shafik, N.**, 1994. Economic development and environmental quality: an econometric analysis. *Oxford Economic Papers* 46, 757–773.
- Sharma, S.S.**, 2011. Determinants of carbon dioxide emissions: empirical evidence from 69 countries. *Applies Energy* 88, 376–382.
- Stern, D.I., Common, M.S.**, 2001. Is there an environmental Kuznets curve for sulfur? *Journal of Environmental Economics and Environmental Management* 41, 162-178.
- Stern, D.I.**, 2000. A multivariate cointegration analysis of the role of energy in the US macroeconomy. *Energy Economics* 22, 267–283.
- Stern, D.I., Common, M.S., Barbier, E.B.**, 1996. Economic growth and environmental degradation: the environmental Kuznets curve and sustainable development. *World Development* 24, 1151–1160.
- Tiwari, A.K., Shahbaz, M., Hye, Q.M.A.**, 2013. The environmental Kuznets Curve and the role of coal consumption in India: co-integration and causality analysis in an open economy. *Renewable Sustainable Energy Review* 18, 519–527.
- World Bank**, World Development Indicators (WDI)
- Zhang, X.P., Cheng, X.M.**, 2009. Energy consumption, carbon emissions, and economic growth in China. *Ecological Economics* 68, 2706–2712.

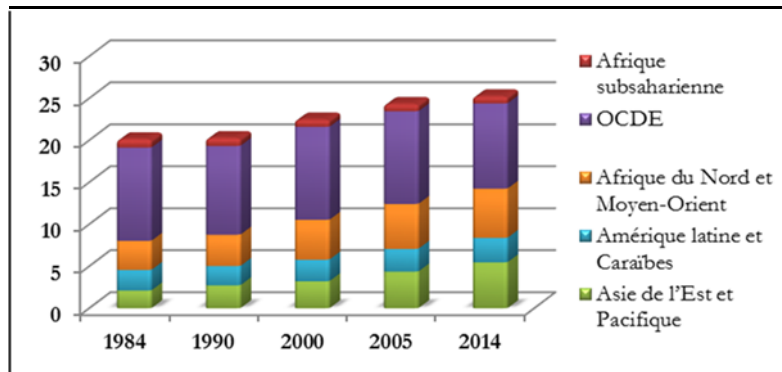
ANNEXE 1. ÉVOLUTION DES ÉMISSIONS DE CO2 SUR LA PÉRIODE 1984-2014

Graphique 1. Emissions de CO2 (Kt) par région, 1984-2014



Source : Données issues de la Banque mondiale, 2016.

Graphique 2 : Emissions de CO2 (en tonnes métriques par habitant) par région, 1984-2014



Source : Données issues de la Banque mondiale, 2016.

ANNEXE 2. DÉFINITION DE L'INDICE DE COMPLEXITÉ ÉCONOMIQUE

Hidalgo et Hausmann (2009) proposent un indicateur basé sur le niveau de diversification des exportations et sur l'ubiquité moyenne des produits que le pays exporte. Une plus grande diversification des exportations sur des produits omniprésents suppose plus de capacités pour produire une gamme plus large de biens avec un avantage comparatif. La complexité reflète donc l'ensemble des capacités productives dont dispose une économie révélée par ses échanges commerciaux.

Cet indice qui varie entre -2,8 et 2,8 a été formalisé à partir de la méthode des réflexions pour calculer simultanément et de manière itérative les mesures de diversité et d'ubiquité.

Une équation mesure la diversité moyenne des pays qui exportent le produit i avec un avantage comparatif révélé (RCA) :

$$K_{i,1} = \frac{1}{K_{i,0}} \sum_c M_{ci} K_{c,0}$$

où c désigne le pays, i représente le produit et M_{ci} est défini comme une matrice égale à 1 lorsque le pays exporte un bien avec un avantage comparatif révélé ($RCA > 1$), ou égale à 0 autrement.

Une autre équation reflète le degré d'ubiquité des biens qu'un pays exporte :

$$K_{c,1} = \frac{1}{K_{c,0}} \sum_i M_{ci} K_{i,0}$$

ANNEXE 3. MATRICE DE CORRÉLATION ET TEST DE VARIANCE INFLATION FACTOR

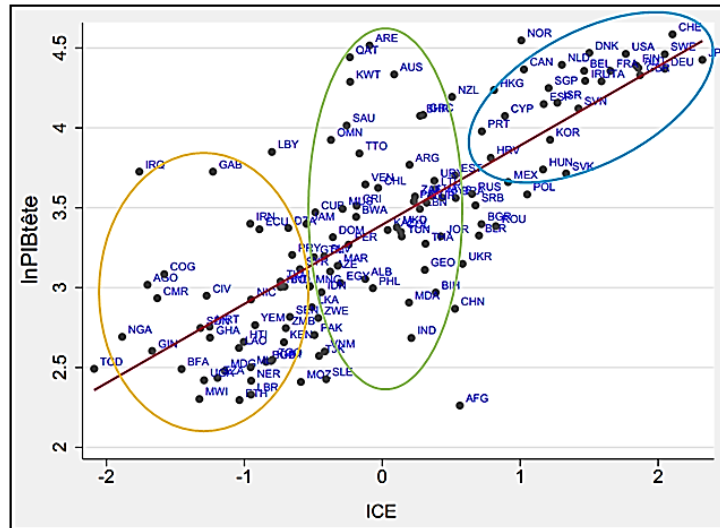
Annexe 3a. Matrice de corrélation entre les variables du modèle

	lnCO2/t	lnICE	lnICE2	lnPib/tt	lnInnov	lnEduc	lnEne-y	lnGouv	lnUrban	lnIDE	Kyoto	OMC
lnCO2/t	1											
lnICE	0.6575	1										
lnICE2	0.6564	0.9450	1									
lnPib/tt	0.6270	0.6403	0.6964	1								
lnInnov	0.4210	0.5417	0.6448	0.6475	1							
lnEduc	0.2503	0.2751	0.2898	0.3820	0.3486	1						
lnEnergy	0.8250	0.5839	0.6112	0.7358	0.4611	0.2184	1					
lnGouv	0.1333	0.1196	0.1088	0.3158	0.2131	0.3621	0.1336	1				
lnUrban	0.7485	0.5357	0.5437	0.7508	0.4087	0.2936	0.6091	0.1965	1			
lnIDE	0.2366	0.3061	0.3128	0.2978	0.2215	0.1569	0.2298	0.3357	0.2269	1		
Kyoto	0.0550	0.0040	-0.0098	0.2304	0.1071	0.3519	0.0533	0.7193	0.1265	0.2774	1	
OMC	0.0408	0.0704	0.0653	0.2838	0.2089	0.3386	0.0478	0.6452	0.1443	0.2610	0.6715	1

Annexe 3b. Test de Variance Inflation Factor

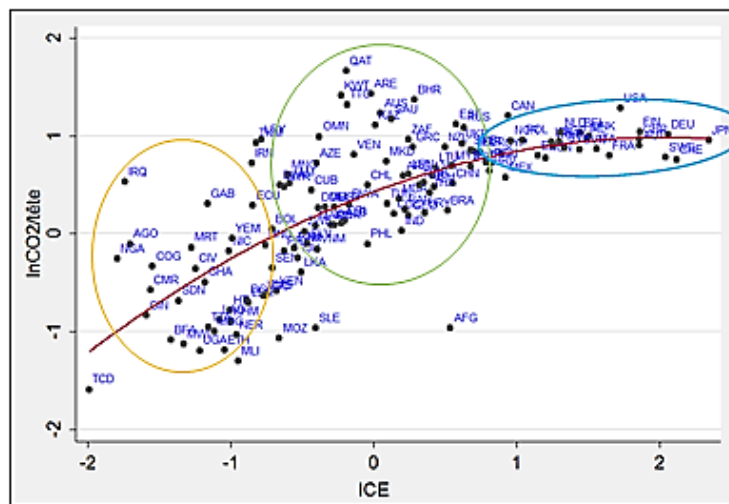
Variable	VIF	1/VIF
lnpibht	4.92	0.203307
kyoto	2.57	0.388575
lnGouv	2.45	0.408959
lnenergy	2.44	0.409397
lnurban	2.44	0.409868
omc	2.14	0.467064
lnice	2.04	0.490359
lnInnov	1.93	0.516822
lneduc	1.35	0.738011
lnide	1.25	0.803003
Mean VIF	2.35	

ANNEXE 4. ICE ET PIB PAR TÊTE, EN MOYENNE SUR LA PÉRIODE 1984-2014



- Pays à revenu faible
- Pays à revenu intermédiaire
- Pays à revenu élevé

ANNEXE 5. ICE ET ÉMISSIONS DE CO2 PAR TÊTE, EN MOYENNE SUR LA PÉRIODE 1984-2014



- Pays à revenu faible
- Pays à revenu intermédiaire
- Pays à revenu élevé

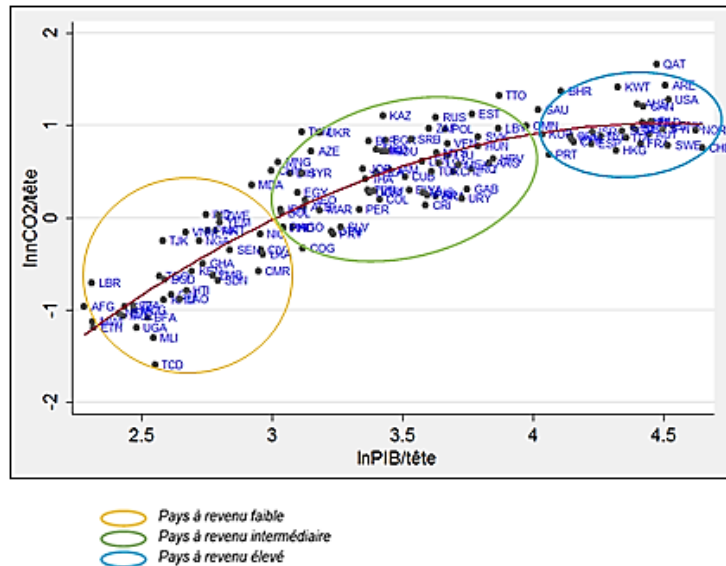
ANNEXE 6. STATISTIQUES DESCRIPTIVES

Variable	Obs	Mean	Std. Dev.	Min	Max
<i>CO2/tête</i>	4123	5.190139	6.880828	.011343	68.5349
<i>ICE</i>	4123	-.0051537	1.016123	-2.78258	2.71882
<i>PIB/tête</i>	4123	8577.695	13455.7	64.8102	99635.9
<i>Innov</i>	4123	.0613307	.1305796	0	.9175428
<i>Educ</i>	4123	3.462086	2.213836	0	44.334
<i>Energy</i>	4123	2129.117	2586.246	1	23109.8
<i>Gouv</i>	4123	35.331618	4.728947	1	98
<i>Urban</i>	4123	56.15055	22.75307	8.534	100
<i>IDE</i>	4123	1.93e+13	2.12e+14	1	3.40e+15
<i>Kyoto</i>	4123	.5498778	.4975668	0	1
<i>OMC</i>	4123	.5007335	.5005494	0	1

ANNEXE 7. LISTE DES PAYS

Pays à revenu élevé	Australia, Austria, Bahrain, Belgium, Canada, Chile, Croatia, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Equatorial Guinea, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hong Kong SAR, China, Iceland, Ireland, Israel, Italy, Japan, Korea Rep., Kuwait, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, New Caledonia, New Zealand, Norway, Oman, Poland, Portugal, Qatar, Russian Federation, Saudi Arabia, Singapore, Slovak Republic, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland, United Arab Emirates, United Kingdom, United States, Uruguay.
Pays à revenu intermédiaire	Albania, Algeria, Angola, Argentina, Armenia, Bolivia, Botswana, Brazil, Bulgaria, Cameroon, China, Colombia, Congo Rep., Costa Rica, Cote d'Ivoire, Cuba, Djibouti, Dominican Republic, Ecuador, Egypt Arab Rep., Gabon, Ghana, Guatemala, Guyana, Honduras, Hungary, India, Indonesia, Iran Islamic Rep., Iraq, Jamaica, Jordan, Lao PDR, Lebanon, Libya, Macedonia, FYR, Malaysia, Mauritania, Mauritius, Mexico, Morocco, Nigeria, Philippines, Romania, Senegal, Serbia, South Africa, Sudan, Swaziland, Syrian Arab Republic, Thailand, Tunisia, Turkey, Ukraine, Venezuela, RB, Vietnam, Yemen Rep.
Pays à revenu faible	Afghanistan, Benin, Burkina Faso, Burundi, Cambodia, Central African Republic, Chad, Congo Dem. Rep., Ethiopia, Gambia, The, Guinea, Haiti, Kenya, Korea Dem. Rep., Liberia, Madagascar, Malawi, Mali, Mozambique, Nepal, Niger, Rwanda, Sierra Leone, Somalia, Tanzania, Togo, Uganda, Zimbabwe.

ANNEXE 8. PIB PAR TÊTE ET ÉMISSIONS DE CO2 PAR TÊTE,
EN MOYENNE SUR LA PÉRIODE 1984-2014



**The Effect of Economic Complexity on Air Pollution:
Another approach to the Environmental Curve of Kuznets**

Abstract - The focus of this paper is to highlight, beyond the effect of GDP per capita, the major role of the evolution of structural transformations on the level of air pollution (CO2 emissions per capita), taking again the model of the Kuznets environmental curve and estimating it on a sample of 133 countries from 1984 to 2014. The influence of structural changes on pollution is evaluated in an original way by an index of economic complexity (ICE). The relative decline in pollution from a certain threshold, particularly noticeable in high-income countries, is more a result of far-reaching structural changes than of development, although there may be some link between them. Thus, the increase in economic complexity makes it possible more quickly to reach the threshold of reversal of the level of pollution than the increase in GDP per capita. This result suggests that to reduce pollution, growth patterns and productive specializations are more important than growth itself and the level of economic development achieved.

Keywords

Economic complexity
Air pollution
Environmental Kuznets Curve
Structural change
Dynamic panel