

**L'effet de la complexité économique
sur la pollution de l'air**

**Une autre approche de la Courbe
Environnementale de Kuznets**

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

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'humanité²⁵. 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, et leurs émissions ne représentent qu'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

²⁵ Par exemple, l'Organisation mondiale de la Santé (2014) annonce que près de 7 millions de personnes sont décédées prématurément en 2012 du fait de l'exposition à la pollution de l'air.

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

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 comme variable explicative en complément du revenu par habitant dans la CEK. En testant la complexité économique, nous essayons de démontrer des trajectoires autres que la CEK classique puisque nous introduisons un élément plus particulier qui joue sur l'environnement au-delà du simple revenu par habitant. Nous réalisons des estimations sur l'ensemble des pays considérés mais aussi pour les groupes de pays à revenu élevé, intermédiaire, faible, ainsi que les pays d'Afrique du Nord et du Proche-Orient (MENA). 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 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.

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

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 et les inégalités sociales. Transposé 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 est 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).

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

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 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). 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

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

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, mais qu'un lien de causalité ne peut être établi pour l'Inde en ce qui concerne les changements structurels et les émissions de CO₂. L'Inde dispose d'une économie informelle beaucoup plus importante que celle de 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 % à travers l'effet d'échelle. 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. Les résultats d'Azomahou et al. (2006) révèlent une

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

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. Des études comme celles de Stern (2002) et Auci et Becchetti (2006) ont essayé de prendre également 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 distinguent 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

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

déterminée par les paramètres α_1 et α_2 . La relation entre $CO_2/tête$ 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 :

$$\begin{aligned} \ln CO_2/tête_{it} = & \alpha_0 + \alpha_1 \ln ICE_{it} + \alpha_2 \ln(ICE)_{it}^2 + \alpha_3 \ln PIB/tête_{it} + \alpha_4 \ln Innov_{it} \\ & + \alpha_5 \ln Educ_{it} + \alpha_6 \ln Energy_{it} + \alpha_7 \ln Gouv_{it} + \alpha_8 \ln Urban_{it} + \alpha_9 \ln IDE_{it} + \\ & \alpha_{10} Kyoto_{it} + \alpha_{11} OMC_{it} + \beta \ln CO_2/tête_{it-1} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \end{aligned}$$

La variable expliquée $CO_2/tête_{it}$ correspond aux émissions de CO_2 par habitant d'un pays i à l'instant 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 aux effets locaux (Meunié, 2004) comme les émissions de dioxyde de carbone ou encore de dioxyde de soufre (Shafik et al., 1992 ; Kaufmann et al., 1998).

Concernant les variables explicatives, ICE_{it} le niveau de complexité économique d'un pays i à l'instant t 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) $Pib/tête_{it}$ 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_{it} (Hausmann et al., 2007. Hidalgo et al., 2009 ; Poncet et al., 2013) est un indicateur utilisé pour rendre compte des déterminants économiques du commerce

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

(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 1980-2012. 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 techniques²⁶ pouvant amener la production ou l'utilisation de produits moins polluants : la création technologique *Innov_{it}* et les dépenses publiques en éducation *Educ_{it}* (signe négatif attendu). Par ailleurs, nous introduisons une variable de contrôle institutionnelle telle que la stabilité du gouvernement *Gouv_{it}* (signe négatif attendu) dont le rôle a été montré dans la littérature en matière de viabilité à long terme de l'environnement et de 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_{it}* (signe positif attendu) et la consommation d'énergie par habitant *Energy_{it}*, dont la littérature montre l'incidence sur la dégradation de l'environnement, et qui présentent une certaine corrélation avec le PIB par tête (voir Annexe 3a).

²⁶ A défaut de variables appliquées à l'utilisation des biens plus écologiques. Les données que nous avons tenté de récolter 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 concerne un échantillon très restreint de pays.

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

L'effet sur l'environnement de l'investissement direct étranger IDE_{it} (en % du PIB) 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.

Outre ces éléments, d'autres variables peuvent 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 ($Kyoto_{it}$, de valeur 1, sinon 0, signe négatif attendu) et de l'impact de l'OMC (OMC_{it} , 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. Nous considérons un échantillon de 133 pays qui couvre une période de 31 années (1984-2014). Les données utilisées sont issues des bases de la Banque mondiale (2016) exceptées les données sur l'ICE qui proviennent de l'Observatoire de la complexité économique du MIT. (Annexe 6-7)

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

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 multicolinéarité entre des variables explicatives suggéré par la matrice de corrélation²⁷.

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 Pagan²⁸. L'hypothèse de présence d'effets aléatoires ne peut pas être rejetée donc l'estimateur GLS paraît plus performant 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 donc privilégier l'adoption d'un modèle à effets aléatoires et retenir l'estimateur GLS²⁹. Une telle méthode d'estimation paraît ainsi plus appropriée qu'une estimation à effets fixes, sous l'hypothèse que le terme d'efficacité 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 ($\ln\text{CO}_2/\text{tete}_{ijkt-1}$) 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

²⁷ Les résultats du VIF sont bien inférieurs à la limite supérieure de 10 (2, 35), ce qui indique que le problème de multicolinéarité est mineur dans nos spécifications.

²⁸ Le test BP nous indique une hétéroscédasticité importante et significative de l'ordre de 675,6*** pour l'échantillon global.

²⁹ 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.

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

simultanéité. L'estimateur GMM va contrôler les caractéristiques des pays non observées invariantes 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 présentés dans le tableau 1 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 (logICE*High/ Middle/Low/ MENA) qui figurent dans le tableau 2. Les tests³⁰ 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.

³⁰ Test d'hétéroscédasticité, d'hétérogénéité, d'endogénéité concernant la version statique, et le test de Sargan pour la version dynamique.

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

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 1 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 (1,2) dans les premiers stades de transformation structurelle et cette tendance décroît à partir d'un certain seuil (-0,8). A plus long terme le coefficient associé à l'ICE est significativement plus faible dans la première phase (0,9) puis décroît dans 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 5. Ce résultat permet d'avancer en la matière l'existence d'une CEK dont le point de retournement se situerait à un niveau de complexité économique de 0,70 à court 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 écologique.

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 1). A plus long terme le coefficient associé au revenu par habitant est significativement plus faible (0,07%). 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 significativement 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

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

l'innovation, à travers une meilleure prise de conscience des enjeux au sujet des questions environnementales.

Les résultats montrent aussi une relation négative et significative à plus long terme de l'innovation (-0,4%) ainsi que des dépenses d'éducation (-0,02%) sur la quantité des émissions de CO₂/tête. Avec un effet significativement 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 du gouvernement 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 3) avec un effet négatif plus important sur la période 2000-2014 (-1,2%).

Les investissements directs étrangers tendent aussi 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). L'effet tend à s'inverser sur la seconde période de l'échantillon avec l'apparition d'un coefficient positif et significatif, ce qui nous amène à penser que les IDE tendent à changer de nature et à améliorer à plus long terme la qualité de l'environnement en apportant des technologies modernes et plus écologique.

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

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

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.

Tableau 1: Résultats de l'estimation pour les 133 pays.

Variable dépendante	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
LogCO ₂ /tête	GLS	GLS	GMM	GMM	GMM
Période	1984-2014	1984-2014	1984-2014	1984-2000	2000-2014
lnCO ₂ /tête _{t-1}			0.728*** (0.0104)	0.755*** (0.0191)	0.616*** (0.0146)
lnICE	1.526*** (0.110)	1.248*** (0.0864)	0.916* (0.0298)	0.0419 (0.0446)	0.723** (0.0438)
lnICE ²	-0.465*** (0.152)	-0.897*** (0.121)	-0.257* (0.0525)	0.00727 (0.0735)	-0.187** (0.0765)
lnPib/tête	0.876*** (0.0124)	0.529*** (0.0143)	0.0691*** (0.00697)	0.0904*** (0.0185)	0.0374*** (0.00830)
lnInnov	-3.678*** (0.179)	-2.610*** (0.142)	-0.353*** (0.101)	-0.609*** (0.233)	-0.893*** (0.165)
lnEduc	-0.152*** (0.0216)	-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)
Constant	-3.139*** (0.0397)	-3.933*** (0.0581)	-0.958*** (0.0536)	-1.012*** (0.0974)	-2.901*** (0.496)

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

Point de retournement d'ICE	1,65	0,69	1,8	Pas significatif	2
Point de retournement de CO2/tête		0.43	0.81	Pas significatif	0.72
Observations	4,123	4,123	3,990	2128	1995
Number of id	133	133	133	133	133
Overall R-sq	0,73	0,78			
Llikelihood	-1691.2	-635.8			
AR(2) p-value			0,914	0,705	0,591
Sargan p-value			0,754	0,564	0,433

Standard errors in parentheses; *** 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 son retard d'ordre (2).

4.2. Analyse par niveau de revenu et par région

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 l'ensemble de la période (1984-2014)³¹ en séparant de l'échantillon les pays à revenu élevé (High), intermédiaire (Middle) et faible (Low), selon les catégories de pays retenues par la Banque mondiale (Annexe 8). De manière plus particulière, nous testons l'existence d'une telle relation dans la région MENA, région très hétérogène sur le plan de la croissance et dans une position géopolitique et géo-climatique censée la rendre vulnérable.

Les résultats du tableau 2 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), à revenu faible (0,046) et MENA (0,052). Ces résultats consolident l'hypothèse liée à l'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 de transformation structurelle uniquement dans les pays à revenu élevé (0,7) et MENA (0,48) puis devient négatif pour les pays à revenu élevé (-0,16) et les pays MENA (-0,13)³² à partir d'un certain seuil dont le point de retournement est à un niveau de complexité économique respectivement de 2,18 et 1,84. 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. Ces pays auront moins d'effort de dépollution dans les années à venir puisqu'ils sont spécialisés dans des domaines complexes

³¹ Les estimations des périodes 1984-2000 et 2000-2014 n'ont pas été intégrées comme dans le tableau 2, parce que les coefficients des variables d'intérêts n'étaient pas significatifs.

³² Valeur des coefficients à court terme. L'effet de ICE dans les pays à revenu élevé est calculé par la somme ($\log \text{ICE} + \log \text{ICE} * \text{High}$) puis dans la seconde phase par la somme ($\log \text{ICE}_2 + \log \text{ICE} * \text{High}_2$).

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

alors que d'autres pays vont encore augmenter leur pollution du fait d'une structure productive moins complexe.

Une courbe en U apparaît dans les pays à revenu faible (composés principalement de pays africains), c'est-à-dire des pays qui sont positionnés au début de la première phase de la courbe (-0,62 puis 0,13). Ce résultat peut être expliqué par leur mode de croissance plus basé sur des industries extractives et à faible technologie correspondant ainsi à la première phase. La seconde phase représentée par un coefficient positif peut être expliquée par l'hypothèse du déplacement, où les industries polluantes (pays à revenu élevé) vont délocaliser leurs activités vers les économies propres (pays à revenu faible) qui auront des coûts environnementaux plus faibles ou des mesures de contrôle de pollution moins contraignantes.

Le budget consacré à l'éducation a un effet significatif pour les pays à revenu élevé (-0,01) dans la baisse des émissions de CO₂ par habitant. Différent du cas des pays à revenu intermédiaire (0,01), faible (0,02) et aucun effet dans les MENA (0,01). Ce résultat peut être expliqué par leur manque de conscience des enjeux environnementaux véhiculé par un système éducatif moins sensibilisé à ce problème climatique. A la différence de l'éducation, la création technologique a un effet très important dans la baisse des émissions de CO₂ par habitant essentiellement dans les MENA (-0,79).

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 (0,01). D'autre part, l'adhésion à l'OMC a un effet significatif à 1% dans la réduction des émissions de CO₂ par habitant notamment dans les MENA (-0,01) suivie des pays à revenu intermédiaires avec un effet moins net.

L'effet lié à la consommation d'énergie par habitant ainsi que l'effet de l'urbanisation sont très élevés et significatifs dans toutes les régions du monde, ce qui est conforme à la littérature économique. L'effet significativement positif des IDE sur les émissions de polluants nous amène à affirmer une nouvelle fois que l'attractivité des IDE pour de nombreux pays n'offre pas d'amélioration de la qualité de l'environnement surtout dans les pays à revenu faible.

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

Tableau 2: Résultats de l'estimation CEK par région selon leur revenu, 1984-2014.

Période 1984-2014 lnCO2/tete	(1) GMM	(2) GMM	(3) GMM	(4) GMM
lnCO2/tete _{t-1}	0.656*** (0.0122)	0.727*** (0.0108)	0.742*** (0.0111)	0.619*** (0.0125)
lnICE	0.453* (0.0340)	0.0436 (0.0618)	0.808** (0.0398)	-0.187* (0.0339)
lnICE ²	-0.123* (0.0629)	-0.0394 (0.106)	-0.143** (0.0685)	-0.126** (0.0605)
LnPib/tête	0.0449*** (0.00802)	0.0483*** (0.00742)	0.0462*** (0.00822)	0.0526*** (0.00832)
lnInnov	-0.472*** (0.0829)	-0.550*** (0.137)	-0.485*** (0.159)	-0.798*** (0.124)
lnEduc	-0.0146** (0.00742)	0.0143* (0.00760)	0.0212*** (0.00808)	0.0109 (0.00752)
lnEnergy	0.248*** (0.0168)	0.133*** (0.0160)	0.173*** (0.0153)	0.260*** (0.0163)
lnGouv	-0.0380** (0.0177)	-0.0144 (0.0163)	-0.0798*** (0.0170)	-0.0414** (0.0178)
lnUrban	0.125*** (0.0263)	0.267*** (0.0328)	0.321*** (0.0300)	0.233*** (0.0342)
lnIDE	0.00155** (0.000638)	0.000515 (0.000659)	0.00192*** (0.000702)	0.00148** (0.000617)
Kyoto	-0.0194*** (0.00461)	-0.0105** (0.00439)	-0.0148*** (0.00451)	-0.0188*** (0.00465)
OMC	0.00519 (0.00558)	-0.0109* (0.00563)	-0.00290 (0.00587)	-0.0136** (0.00564)
lnICE*HIGH	0.257*** (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)	
lnICE*MENA				0.670*** (0.0631)
lnICE ² *MENA				-0.017**

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

Constant	-0.983*** (0.0556)	-0.926*** (0.0573)	-1.056*** (0.0594)	(0.0122) -1.151*** (0.0570)
Point de retournement d'ICE	2,18	-	2,38	1,84
Observations	3,990	3,990	3,990	3,990
Number of id	133	133	133	133
AR(2) p-value	0,921	0,915	0,928	0,89
Sargan p-value	0,624	0,65	0,71	0,592

Standard errors in parentheses. *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1.

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

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

Nos résultats nous laisseraient penser aujourd'hui que l'accroissement de la complexité économique permettrait plus rapidement d'atteindre le seuil de retournement du niveau de pollution que l'accroissement du PIB/tête. Pour vérifier cela, nous décidons de procéder à une nouvelle estimation qui permettrait de comparer les résultats de notre modèle CEK à celui estimé avec les variables PIB/tête et PIB/tête².

Le 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. Ces résultats confortent l'hypothèse d'un effet d'échelle où la croissance de l'activité économique engendre l'accroissement des émissions de polluants, permettant d'avancer en la matière l'existence d'une CEK 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 (-0,53). 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.

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

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

Variable dépendante	(1)	(2)
lnCO2/tête	GLS	GMM
Période	1984-2014	1984-2014
lnCO2/tête _{t-1}		0.541*** (0.0142)
lnPIB/tête	1.700*** (0.0793)	0.428*** (0.0439)
lnPIB/tête ²	-0.171*** (0.0114)	-0.0515*** (0.00615)
lnICE	-0.538*** (0.0375)	-0.0161* (0.0223)
lnInnov	-1.936*** (0.154)	0.0787 (0.185)
lnEduc	-0.0519*** (0.0172)	0.00615 (0.00808)
lnEnergy	0.418*** (0.0113)	0.264*** (0.0218)
lnGouv	-0.0275 (0.0420)	-0.0467** (0.0198)
lnUrban	0.330*** (0.0314)	0.224*** (0.0402)
lnIDE	-0.00498*** (0.00186)	0.00117* (0.000679)
Kyoto	-0.00844 (0.0136)	-0.0255*** (0.00512)
OMC	-0.131*** (0.0123)	-0.0193*** (0.00657)
Constant	-5.403*** (0.130)	-1.798*** (0.0931)
Point de retournement du PIB/tête	4,97	4,28
Point de retournement du CO2/tête	4,25	0,88
Observations	4123	3990
Number of id	133	133
Overall R-sq	0,59	
Likelihood	-498.7	
AR(2) p-value		0,805
Sargan p-value		0,769

Standard errors in parentheses. *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1.

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

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 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 CO ₂ (en tonnes métriques) par habitant	2.41	2.24

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

5. Conclusion et implications des politiques économiques

L'objectif de cet article était d'analyser l'effet de l'indicateur de complexité économique (ICE) sur le niveau de pollution en modifiant un paramètre dans le modèle CEK classique permettant de prendre en compte l'évolution de la structure productive comme un élément central du modèle CEK. En effet, en testant la complexité économique comme variable principale de l'effet de composition, nous pouvons évaluer des trajectoires autres que la CEK classique puisque nous introduisons un élément particulier qui joue sur l'environnement au-delà du seul revenu par habitant. Il se dessine une relation en U inversé entre ICE et pollution dans les pays à revenu élevé et MENA. La complexification des tissus productifs conduit à une intensité de pollution par habitant plus importante dans les premiers stades de transformation structurelle, puis s'amointrit au-delà d'un certain seuil. Ces pays se développent et deviennent en même temps plus écologiques.

Nous avons fait appel à différentes spécifications afin de tester la robustesse des résultats obtenus par l'analyse exploratoire des données en panel. Nos résultats montrent que sur le plan macroéconomique, la courbe en U inversé n'est pas valable pour toutes les régions du monde car l'effet de composition à l'échelle d'une économie ne peut pas être reproduit à l'échelle mondiale. Tant qu'il y a une demande pour des produits polluants, la production se fera, même si le lieu de la production peut changer au cours du temps en fonction de l'évolution des avantages comparatifs. Toutefois, il est plus facile aujourd'hui aux pays à revenu intermédiaire de franchir le sommet de la CEK grâce à la production de produits plus complexes qui n'étaient pas disponibles lorsque les économies industrielles étaient au même stade de développement.

Outre l'effet de structure, nous caractérisons l'effet d'échelle et l'effet technique (PIB/tête) et l'effet technique (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.

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

Ce chapitre nous amène donc à penser que la diminution de la pollution à partir d'un certain seuil a été le résultat d'une profonde transformation structurelle au-delà de l'effet du niveau de développement. Toutefois, ce résultat nous interpelle sur le poids qu'a l'ICE par rapport au PIB/tête sur la courbe en U inversé. Pour cela, nous avons ré-estimé le modèle en remplaçant les variables ICE et ICE2 par PIB/tête et PIB/tête². Les estimations révèlent que le seuil de retournement de la pollution dépendant dans ce modèle du PIB/tête est plus élevé que le seuil lié à l'indicateur de complexité économique ICE donné dans le modèle précédent, que l'on peut discerner graphiquement dans l'annexe 8 par rapport à l'annexe 5. 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/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.

Ce résultat est une contribution originale apportant des implications à la fois pour la recherche future sur la courbe environnementale de Kuznets mais aussi sur la prise de décision politique à travers des réformes ciblées en tirant les enseignements des erreurs passées en matière de pollution, d'aménagement du territoire et d'exploitation des ressources. Face à ces résultats, les décideurs devraient construire un accord international plus contraignant (Cop22) visant à adopter des politiques pour stimuler une croissance plus écologique, essentiellement dans les économies en développement, afin d'accélérer la convergence des normes environnementales occidentales supposées plus écologiques en favorisant une production plus complexe qui préserve les ressources naturelles et réduit la pollution par unité de production. Des mesures peuvent être reconduites telles que les taxes sur les émissions présumées (droit d'émission négociable), ou encore les subventions en R&D (dans la production de produit plus complexe) et de rendement énergétique, ainsi que la mise en place de normes obligatoires des techniques anti-

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

pollutions.³³Toutefois, même si ces outils ont été et seront nécessaires pour inciter les pouvoirs publics à adopter de nouvelles lois environnementales, celles-ci ne sont pas encore assez rigoureuses dans certaines régions du monde. La pauvreté est une des raisons pour lesquelles de nombreuses économies tardent à mettre en œuvre des mesures de protection de l'environnement. Certaines régions n'ont tout simplement pas les moyens de consacrer des ressources à lutter contre la pollution, ou pensent qu'ils n'ont pas à sacrifier leurs perspectives de croissance pour régler des problèmes de pollution mondiaux qui résultent en très grande partie de la consommation des économies riches. Il faudrait ainsi éviter l'exportation des activités polluantes et à risque dans les économies qui sont moins exigeants à cet égard et ne correspondant pas à une certaine norme environnementale.

Les instruments de politique commerciale représentent aujourd'hui un moyen peu coûteux d'inciter les pays en développement à adopter des standards de consommation et des méthodes de production plus complexe et moins nocives pour l'environnement³⁴. Il s'agit en fait d'amener les pays en développement à internaliser dans une certaine mesure les coûts environnementaux par la simple modification des conditions dans lesquelles ils produisent et exportent leurs produits. Toutefois, le commerce international peut jouer un rôle positivement direct sur l'environnement. En effet, les exigences environnementales des grands marchés internationaux incitent les économies en développement à améliorer les standards de production et les réglementations sur leurs marchés domestiques, par conséquent les échanges commerciaux contribuent à la diffusion des standards pro-environnementaux. D'autre part, l'acquisition et la maîtrise des technologies écologiquement justes est cruciale pour atteindre l'objectif du développement durable, d'où la nécessité d'une action concertée au niveau international visant à promouvoir ou faciliter le transfert international des produits plus complexes. Toutefois ce programme rencontre actuellement des difficultés

³³ Comme par exemple le cas des catalyseurs pour moteurs d'automobiles et les équipements de lavage des gaz de cheminées d'usines qui ont généré une baisse considérable de la pollution atmosphérique dans les régions où ils ont été rendus obligatoires.

³⁴ Nous avons démontré que l'adhésion à l'OMC a un effet significatif sur la réduction de la pollution de l'air.

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

sérieuses liées à l'absence de financement sur le plan international et local. En effet, le problème du financement reste au cœur de la problématique des émissions de gaz à effet de serre. La préoccupation environnementale constitue rarement une priorité dans les pays en développement, ceci dit la COP22 a su produire une forme de pré-mobilisation de lutte contre le réchauffement climatique. Il faut donc trouver du financement à l'extérieur. D'une part, il y a l'aide publique au développement qu'elle soit bilatérale ou multilatérale. Or, aujourd'hui le montant de cette aide reste insuffisant pour réaliser des projets à caractère environnemental. D'autre part, la conversion de la dette des pays en développement en fonds pouvant servir à la protection de l'environnement peut être une solution qui a peu été exploitée jusqu'à présent.

Enfin, il ne faut pas perdre de vue l'importance de la lutte contre les comportements criminels des entreprises (telle que la création de dépôts de déchets dangereux) et des ménages, ou encore contre la corruption, qui constituent un obstacle de taille pour la mise en place efficace de la politique environnementale. La complexification des systèmes productifs est donc un paramètre crucial à prendre en compte, elle joue un effet significatif sur l'environnement, mais peut aussi jouer un tout autre effet sur des variables relatives au développement humain à savoir les inégalités de genre en éducation. Dans le prochain chapitre, nous démontrons une relation directe entre la complexité économique et les inégalités de genre en éducation pour évaluer de nouvelles trajectoires de développement.

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

Références

- 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* Vol. 91, 877–908 No.4, Sept.
- 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 nonparametric panel approach. *Journal 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*, Vol. 68, No. 5, pp. 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, Farzanegan M., Thum M., 2012. Pollution, shadow economy and corruption: Theory and evidence. *Ecological Economics* 75 (2012) 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, Brian R. and M. Scott Taylor. 2004. Trade, Growth, and the Environment. *Journal of Economic Literature*, 42(1): 7-71
- Copeland, B., Taylor, M.S., 1997. A Simple Model of Trade, Capital Mobility and the Environment, NBER, No. 5898, Cambridge, MA.
- Copeland, B., Taylor, M.S., 1994. North–south trade and the environment. *Quarterly Journal of Economics* 109 (3), 755–787.

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

Dasgupta, Laplante B, Hua Wang; Wheeler, 2002. Confronting the Environmental Kuznets Curve *The Journal of Economic Perspectives*, Vol. 16, No. 1. pp. 147-168.

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*, MIT Press, vol. 87(1), pages 85-91.

Friedl, Getzner, 2003. Determinants of CO2 emissions in a small open economy *Ecological Economics*, 45 (2003), pp. 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." Background Paper for the Pacific Basin Economic Council/World Bank Roundtable on "Expanding Public-Private Partnerships: Economic Competitiveness and Environmental Concerns in the Asia-Pacific Region." Hong Kong, September.

Gentry, B., 1998c. "Encouraging Public-Private Regulatory Dialogue." Background Paper for the PBEC/World Bank Roundtable, Hong Kong, September.

Grossman, G., 1995. Pollution and growth: What do we know? In: Goldin and Winter (Eds.), *The Economics of Sustainable Development*. Cambridge University Press, 1995.

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. National Bureau of Economics Research Working Paper, No. 3194. NBER, Cambridge.

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, Mark T., Selden, Thomas M., 2001. Carbon emissions and economic development: future trajectories based on historical experience, *Environment and Development Economics*, Cambridge University Press, vol. 6(01), pages 63-83, February.

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.

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

- 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 and Smyth, 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 Ž2000.
- 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* 2011; 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.

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

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* Vol. 51, pp. 104–118, 2013

Ren S, et al, 2014. The impact of international trade on China's industrial carbon emissions since its entry into WTO. *Energy Policy* 69 (2014) 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*, Elsevier, vol. 56(2), pages 176-189, February.

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. and 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)

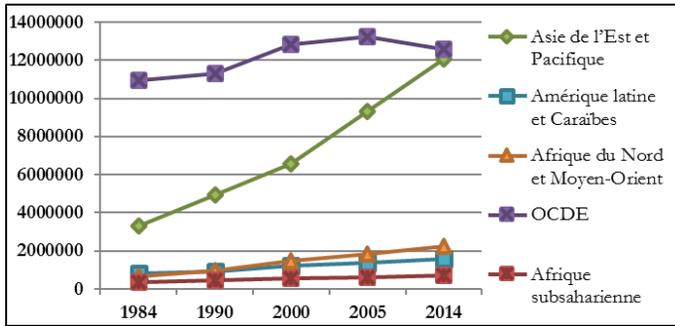
Zhang, X.P., Cheng, X.M., 2009. Energy consumption, carbon emissions, and economic growth in China. *Ecological Economics*. 68, 2706–2712.

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

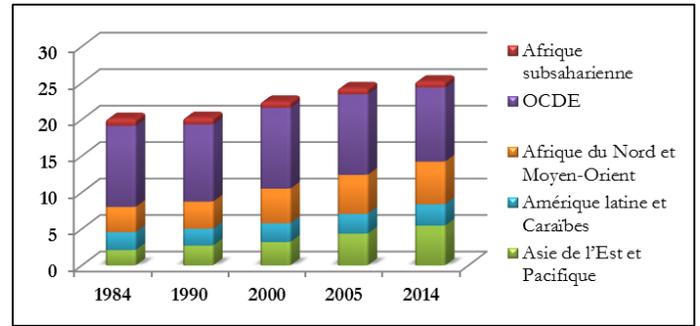
Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

Annexe 1. Evolution des émissions de CO2 sur la période 1984-2014

Graphique 1 : Emissions de CO2 (Kt) par région, sur la période 1980-2014.



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



Source : Données issues de la Banque mondiale, 2013.

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

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 l'ubiquité moyenne des produits que le pays exporte. La justification de cette approche est qu'un pays plus diversifié a plus de capacités nécessaires pour produire une gamme plus large de biens. Un bien qui est moins omniprésent nécessite des capacités plus exclusives. La complexité reflète l'ensemble des capacités dont dispose une économie et les capacités requises par un produit.

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 d'ubiquité et de diversité.

L'équation (1) mesure la diversité moyenne des économies qui exportent le produit i avec avantage comparatif révélé :

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

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

De même, la complexité d'une économie ne doit pas seulement être associée à la diversité, mais celle-ci doit aussi refléter le degré d'ubiquité des biens qu'il exporte :

$$K_{c,1} = \frac{1}{K_{c,0}} \sum_i M_{ci} K_{i,0} \quad (2)$$

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

Annexe 3. Matrice de corrélation et test de *Variance Inflation Factor*

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

	logCO2 /tt	logICE	logICE2	LogPib/ tt	logInno v	logEduc	logEne~ y	logGou v	logUrba n	logIDE	Kyoto	OMC
logCO2/tt	1.0000											
logICE	0.6575	1.0000										
logICE2	0.6564	0.9450	1.0000									
LogPib/tt	0.6270	0.6403	0.6964	1.0000								
logInnov	0.4210	0.5417	0.6448	0.6475	1.0000							
logEduc	0.2503	0.2751	0.2898	0.3820	0.3486	1.0000						
logEnergy	0.8250	0.5839	0.6112	0.7358	0.4611	0.2184	1.0000					
loggouv	0.1333	0.1196	0.1088	0.3158	0.2131	0.3621	0.1336	1.0000				
logUrban	0.7485	0.5357	0.5437	0.7508	0.4087	0.2936	0.6091	0.1965	1.0000			
logIDE	0.2366	0.3061	0.3128	0.2978	0.2215	0.1569	0.2298	0.3357	0.2269	1.0000		
Kyoto	0.0550	0.0040	-0.0098	0.2304	0.1071	0.3519	0.0533	0.7193	0.1265	0.2774	1.0000	
OMC	0.0408	0.0704	0.0653	0.2838	0.2089	0.3386	0.0478	0.6452	0.1443	0.2610	0.6715	1.0000

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

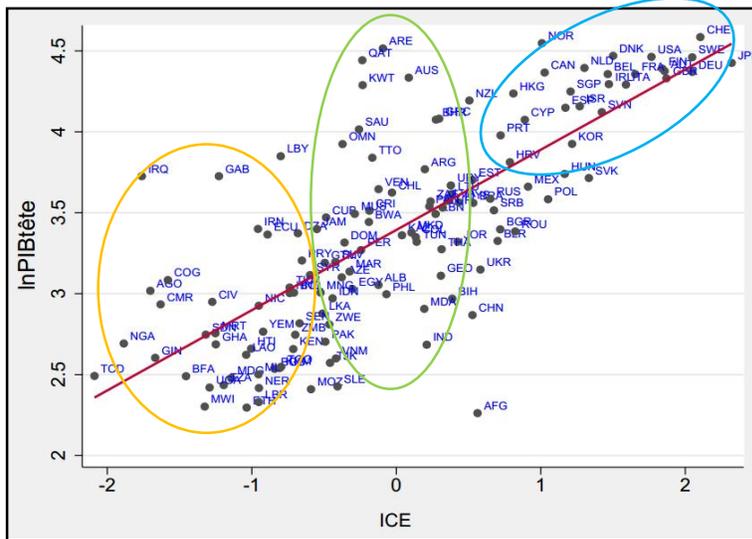
Annexe 3b. Test de *Variance Inflation Factor*

Variable	VIF	1/VIF
logpibhbt	4.92	0.203307
kyoto	2.57	0.388575
loggouv	2.45	0.408959
logenergy	2.44	0.409397
logurban	2.44	0.409868
omc	2.14	0.467064
logice	2.04	0.490359
logInnov	1.93	0.516822
logeduc	1.35	0.738011
logide	1.25	0.803003
Mean VIF	2.35	

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

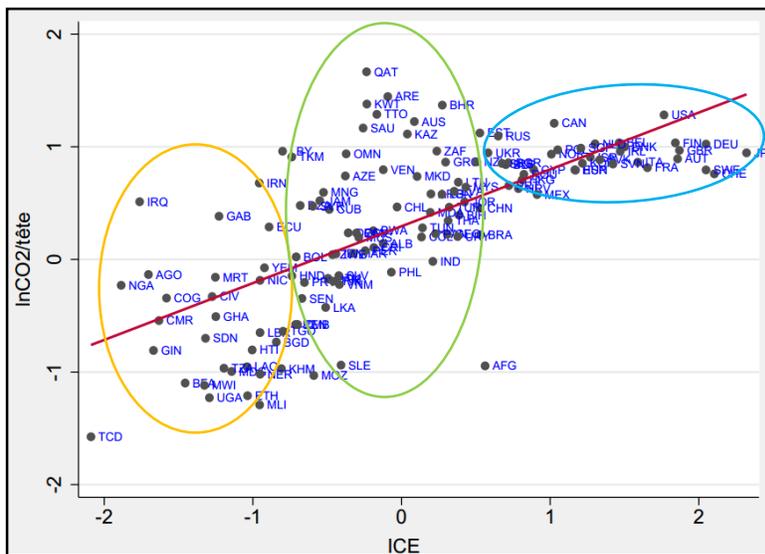
Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

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 Emissions de CO2/tête, en moyenne sur la période 1984-2014



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

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

Annexe 6. Statistiques descriptives

Variable	Obs	Mean	Std. Dev.	Min	Max
LogCO2/tête	4123	.2973562	.7298772	-1.94527	1.83591
logICE	4123	-.0051537	1.016123	-2.78258	2.71882
LogPib/tête	4123	3.437823	.6991184	1.81164	4.99842
logInnov	4123	.0231116	.0466619	0	.2827451
logEduc	4123	.4504797	.2886247	-.1078	1.64674
logEnergy	4123	3.025253	.5961906	0	38
logGouv	4123	1.199375	.1568548	.573545	1.35082
logUrban	4123	1.701835	.2224562	.931153	2
logIDE	4123	1.077357	0.0516816	0	1.642
Kyoto	4090	.5498778	.4975668	0	1
OMC	4090	.5007335	.5005494	0	1

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

Annexe 7. Indicateurs et Source

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

Chapitre 3 : L'effet de la complexité économique sur la pollution de l'air :

Une autre approche de la Courbe Environnementale de Kuznets

Annexe 8: Liste des pays

<p><u>Pays à revenu élevé</u></p>	<p>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.</p>
<p><u>Pays à revenu intermédiaire</u></p>	<p>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.</p>
<p><u>Pays à revenu faible</u></p>	<p>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.</p>
<p><u>Pays Mena</u></p>	<p>Algeria, Bahrain, Egypt, Iran, Iraq, Israel, Jordan, Kuwait, Lebanon, Libya, Morocco, Oman, Qatar, Saudi Arabic, Syria, Tunisia, Turkey, United Arab Emirates, Yemen.</p>