



Cit this: *JOWSET*, **2016** (01), N° 02, 52-66

## Atmospheric pollution and economic growth : an empirical analysis of the Environmental Kuznets curve in Tunisia (1970-2009)

**SéliMA BEN ZINEB**

*Doctorante en Sciences Économiques à la FSEG de Tunis el Manar et chercheur au Laboratoire de Recherche Interdisciplinaire sur les Mutations des Économies et des Entreprises (LARIME) de l'ESSEC de Tunis.*

*Corresponding Author: E-mail: selima\_bz@yahoo.fr*

In this paper, we examined the relationship between air pollution and economic growth for the case of Tunisia at the beginning of 1970. Our study carried out in particular on the basis of verification of the hypothesis of environmental Kuznets curve by using time series data in VAR model. As indicators of pollution measurement of the area, were chosen, CO<sub>2</sub> emissions per capita (PECO<sub>2</sub>), SO<sub>2</sub> emissions per capita (PESO<sub>2</sub>) and NO<sub>x</sub> emissions per capita (PENOX). Our dependent variable measuring economic growth is defined by the real per capita GDP (PGDP). We identified a cointegrating relationship between economic growth and the series of emissions. Furthermore, the assumption of CEK has been confirmed for the case of Tunisia, where the mapping showed us a curve in the shape of an inverted U-characterized by a rising phase that peaked when the level GDP was highest to move to a new downward phase where environmental quality is improving over time. First, the amount of GDP according to which CO<sub>2</sub> emissions began to decline is estimated at approximately \$ 2046.7 or the equivalent of \$ 6444.8 (in purchasing power parity (PPP) at constant prices 2005). Second, the turning point of EKC-PESO<sub>2</sub> according to which Tunisia has been able to control SO<sub>2</sub> emissions was estimated at the value of \$ 1528.5 on the amount of \$ 4,093.2 (in purchasing power parity (PPP) in constant prices of 2005). Third, in the case of NO<sub>x</sub> emissions per capita, a new phase decreasing was recorded at CEK-PENOX when real GDP per capita reached a level of \$ 1500.6 which is a comparison, similar to \$ 4018.6. In terms of the direction of causality, we identified a causal relationship to Granger from GDP to the different emissions which justifies that the implementation of a range of measures protecting the environmental quality of Tunisia should be the top priority in the context of sustainable development and enhancing the long-run growth.

Received: 23 November 2016  
Accepted: 06 December 2016  
Available online: 11 December 2016

### Keywords :

Environmental Kuznets Curve EKC  
Air pollution  
Pollutant emissions  
Cointégration relation  
Tunisia

### Introduction

Ce sont les années 1700 des anciennes époques qui ont connus les révolutions industrielles engendrant par la suite une mutation radicale du système organisationnel en un tissu productif basé en particulier sur l'exploitation de l'énergie comme

moteur pour l'achèvement et l'accomplissement de l'activité économique. Il s'agit notamment d'une transformation en passant à une société commerciale et industrielle dont l'objectif principal s'est orienté vers la croissance économique et l'amélioration du système productif.

Actuellement, la prise de conscience de la protection de la qualité de l'environnement contre la dégradation et les catastrophes naturelles ; dont les causes peuvent être attribuées au réchauffement planétaire, aux changements climatiques et aux externalités négatives ; est devenue une préoccupation primordiale des décideurs politiques de plusieurs pays à travers le monde entier. Ils ont pris en considération cette nouvelle orientation dans leurs politiques visant le développement et l'avancement de la croissance de leurs pays dans un contexte de la rareté des richesses. Ce sont les années 50 ; pendant lesquelles l'avancement et l'accélération ont caractérisé les pays Asiatiques et Américains ; qui ont influencé les orientations de tous les pays à être conscients face à la protection de l'environnement et à la prise en considération de l'utilisation efficace des ressources, [12] ce qui n'était pas le cas pour la région du MENA.

Pour une bonne raison, la négligence de la dimension environnementale dans les politiques de long-terme, pendant ces années, a été justifiée au niveau de la déclaration du conseiller régional de l'environnement de la région MENA pour la banque mondiale en affirmant que quinze ans plus tard, l'intérêt porté à la question environnementale a fait un bond en avant et la région est passée d'un investissement nul dans la protection de l'environnement à des investissements dans chaque pays . Il en résulte par la suite au début de l'année 1999 un changement brusque et important qui a donné une orientation nouvelle et décisive de la région MENA envers la préoccupation de la protection environnementale vu que pendant ces dernières décennies, il y a eu un accroissement des émissions polluantes et une augmentation des coûts liés aux pratiques mises en œuvre dans le but de réduire ces émissions. Ce changement au niveau de l'orientation de la région MENA s'est produit lors de l'intervention de la banque mondiale en mettant en évidence les pertes à supporter par les pays qui ne portaient pas attention sur les risques [en termes de qualité et en termes de coûts] résultant de la détérioration de la composante environnementale. Ces informations sont extraites de la banque mondiale pour l'année 2010.

L'agence nationale de maîtrise de l'énergie a mentionné que la dégradation de la qualité de l'environnement est expliquée par plusieurs facteurs tels que les effets néfastes des émissions de gaz à effet de serre ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ...) résultants des activités de production dont l'achèvement nécessite une utilisation massive de l'énergie où 50% des émissions de gaz à effet de serre en Tunisie sont générées par le secteur de l'énergie.

Dans ce cadre, certaines mesures ont été mises en œuvre par un certain nombre de pays à l'échelle internationale assurant la réduction des émissions de gaz à effet de serre par les pays industrialisés telles que la ratification de l'accord général en 1992 des Nations-Unis sur le sujet des changements climatiques, suivi par la naissance du Protocole de Kyoto pour l'année 1997 et finalement les conventions de Marrakech établies en 2001. Par ailleurs, selon [22]), ces différentes conventions ont été approuvées au commencement de l'année 2005 sur le même sujet qui est celui de minimiser les émissions de gaz à effet de serre entre 2008-2012 dans un régime climatique Rio-Kyoto [6].

D'une manière générale, la relation entre la croissance de l'activité économique et la performance de l'environnement a été traitée et discutée souvent dans plusieurs études antérieures autour de l'analyse de la courbe environnementale de Kuznets (CEK) (tout au long du traitement de cet article, CEK désigne la Courbe Environnementale de Kuznets), [43-39-11]. Ces analyses ont stimulé plusieurs analystes économiques qui ont tenté de vérifier que l'avancement et la performance économique des pays peuvent aboutir à une dégradation environnementale et que sa stabilisation est en fonction de la réalisation d'un degré minimum de développement, [27-18-2-10-41-1].

Avec les problèmes environnementaux à l'échelle internationale, nous nous sommes intéressés dans cet article à étudier l'impact de la pollution atmosphérique sur la croissance économique dans le cadre d'une analyse de la CEK pour le cas de la Tunisie à partir de l'année 1970. Le choix de la Tunisie se justifie par le fait qu'elle a été classée parmi les économies de la région de l'Afrique du Nord connue par une forte puissance de sa croissance économique, et ce, par la mise en application d'une panoplie de programmes d'ajustement structurel. Par ailleurs, lors du forum économique mondial à Davos de l'année 2008, la Tunisie a réalisé un indice de performance environnementale élevé qui lui a permis d'être classée à la tête des pays arabes et africains pour les rangs de l'IPE en occupant le 59<sup>ème</sup> rang sur un ensemble de 149 pays.

En se basant sur les éléments qui reflètent l'état de « santé environnementale », « la pollution atmosphérique », « les ressources en eau », « la biodiversité et l'habitat », « les ressources naturelles » et « les changements climatiques » [16].

L'indice de performance environnementale [IPE] a été créé en vue d'évaluer, comparer et améliorer l'efficacité des politiques environnementales [source : PopulationData.net]. Il s'est basé sur les

critères suivants : l'accès à l'eau potable - l'assainissement - la mortalité infantile - la pollution intérieure - les particules dans l'air urbain - l'ozone dans l'air - les Nitrates dans l'eau - la consommation d'eau - la protection des régions sauvages - la protection des écorégions - l'exploitation forestières - la surpêche - les subventions agricoles - l'efficacité énergétique - les énergies renouvelables - les émissions de CO<sub>2</sub>.

La démarche du reste de cet article se présentera comme suit : la deuxième section portera sur une analyse théorique de la CEK et d'une exposition de revue de la littérature empirique. Une investigation empirique sur l'effet de la pollution sur la croissance économique dans le contexte de la CEK en Tunisie fera l'objet de la troisième section de cet article. Cette section mettra l'accent sur une simple présentation du contexte économique et énergétique de la Tunisie. Enfin, quelques conclusions et discussions feront l'objet de la dernière section.

### 1. Analyse théorique de la CEK

#### • Revue de la littérature théorique

Cette hypothèse émise par [21] a mis l'accent sur la présence d'une relation sous la forme de **U** inversé, [37-14], reliant le niveau atteint de la croissance économique de chaque pays par l'utilisation efficiente et équitable de ses ressources.

Lorsque la croissance est basée sur l'activité d'investissement, la période d'augmentation des inégalités ne serait que provisoire et elle finit par se stabiliser si un niveau minimum de revenu est atteint [21].

En effet, en se référant aux analyses antérieures, la performance de l'environnement économique dans les pays les plus développés conduit à une dégradation environnementale au cours du temps (illustrée au niveau de la première phase de la courbe de Kuznets). À cause de l'intensification de la pollution atmosphérique, les pays s'engageaient à protéger leurs environnements et ce à travers les ressources existantes. Selon plusieurs auteurs [9] [24], si une économie a pu atteindre un niveau de revenu bien déterminé cela va induire à une réduction des émissions carboniques ce qui définit la deuxième phase de cette courbe (CEK). Dans le contexte de cette analyse, une étude menée par [14] (suivant laquelle ils analysaient la nature de la relation existante entre une variété d'indicateurs environnementaux et le revenu) leurs a permis de déduire que l'avancement des pays suite au développement économique n'est pas suivi d'une dégradation environnementale. Plus précisément, la première phase est caractérisée par une croissance économique suivie d'une détérioration

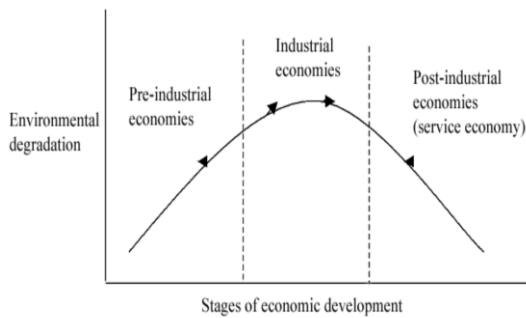
de la qualité de l'environnement qui s'achève par l'apparition d'une deuxième phase dont la qualité de l'environnement est plus améliorée, [16]. Dans le contexte de l'analyse de la courbe de Kuznets, la relation entre la croissance et la qualité de l'environnement est expliquée suivant trois effets spécifiques : effet d'échelle de l'activité économique, effet du revenu sur la demande pour des efforts de réduction de la pollution et effet des changements dans la structure de l'activité économique.

On parle de l'effet d'échelle de l'activité économique si une augmentation de la croissance exige un accroissement des émissions polluantes ; c'est-à-dire ; un accroissement de l'activité entraîne une amplification des émissions polluantes [20-3]. Plus précisément, pour ce type d'effet, la relation liant la croissance économique et le niveau des émissions se présente suivant une fonction croissante monotone dans la mesure où une augmentation du revenu (ou du PIB) entraîne une hausse de ces émissions. [3]

Si on a tendance à accroître la croissance économique des pays tout en respectant les normes environnementales, on parle donc de l'effet de revenu sur la demande pour des efforts de réduction de la pollution, [3]. Autrement dit, les entreprises à fortes émissions polluantes ont recours à de nouvelles techniques et procédures plus développées et plus évoluées pour protéger la nature de l'environnement tout en augmentant la croissance de l'activité économique, [20]. Prenons l'exemple de l'activité de l'agriculture et de l'activité industrielle : le changement de la première activité (agriculture) par la deuxième (industrielle) conduit à un accroissement des éléments nocifs pour l'environnement [3]. Par ailleurs, si l'accroissement du niveau de la croissance économique sera accompagné par une diminution immédiate des niveaux de la pollution atmosphérique, on parle dans ce cas de l'effet des changements dans la structure de l'activité économique [20-3]. En d'autre terme, cet effet explique que la performance de l'environnement ne sera atteinte qu'à travers la réalisation de niveaux de revenu élevés. Cet effet de composition peut se justifier à travers l'idée développée par [3] suivant laquelle il a suggéré que l'accumulation des richesses à long-terme est la manière particulière de faire évoluer positivement la qualité de l'environnement. Cette idée a été prouvée par le fort rapport de cause à effet entre la mise en pratique des instruments visant à préserver la qualité de l'environnement (effet technique) et le niveau de revenus réalisés [3-16].

La figure ci-dessous illustre les stades du développement économiques en fonction de la

dégradation environnementale. (Voir la figure (1) illustrée ci-dessous).



**Fig.1** : Présentation de la Courbe Environnementale de Kuznets. Source: [14]

De ce fait, l'idée d'atteindre un environnement assez développé et assez performant en termes de qualité sur une longue durée ne peut se réaliser qu'à travers l'avancement et le développement économique. Cette hypothèse controversée à celle de [21] justifie un autre type d'approche connue par l'approche de la durabilité faible caractérisée par une substitution entre les ressources naturelles et celles provoquées par l'être humain dans la mesure où l'amélioration du revenu contribue au développement de la qualité de l'environnement. Cette substitution va nuire à la performance environnementale du fait que l'utilisation totale des différentes ressources va contribuer à une dégradation de l'environnement et à un appauvrissement de ses richesses [16].

#### • *Revue de la littérature empirique*

En analysant la littérature empirique relative à cette courbe, on a identifié des études appliquées au niveau de chaque pays tels que la Suède à travers l'étude de [25], l'Allemagne à travers l'application menée par [16] et la France à travers l'étude de [19]. Selon l'hypothèse de la courbe CEK, la qualité de l'environnement peut s'améliorer qu'à travers la croissance et le développement de l'économie à long-terme. Les débats quant à cette hypothèse ont été justifiés par la diversité des résultats identifiés au niveau de plusieurs applications empiriques dans ce domaine de recherche. D'après une analyse approfondie de plusieurs travaux [38-37-7-15], on remarque la présence de preuves illustrant que l'hypothèse de la courbe de Kuznets est applicable. En revanche, en se basant sur d'autres évidences empiriques extraites des travaux antérieurs [8-26-17] et [22], on constate l'absence d'appuis concrets justifiant l'existence d'une telle hypothèse et ce par l'identification d'une relation continuellement croissante ou décroissante (monotone) entre la dégradation environnementale et la croissance

économique. Ils ont travaillé notamment sur des données de Panel. Selon d'autres auteurs (tels que [25]), les applications empiriques traitant la relation entre la dégradation de l'environnement et le niveau de revenu au niveau individuel peuvent éliminer les problèmes provoqués par les évidences empiriques en coupe transversale, [24]. L'analyse au niveau des séries temporelles de l'hypothèse de la CEK, et ce au niveau individuel, peut aboutir à la fixation de politiques environnementales adéquates pour chaque pays dans la mesure où l'interaction entre les variables peut être mieux compréhensible pour ce type d'analyse.

## 2. *Analyse empirique de la CEK en Tunisie*

### • *Contexte économique et énergétique*

Pour développer cette sous-partie, on va se baser sur les statistiques mondiales, sur la présentation de la Tunisie selon la France diplomatie, sur [13] et sur [15].

Depuis l'année 1995, l'économie tunisienne a été caractérisée par un taux de croissance du PIB dépassant les 5%. De ce fait, elle a été classée parmi les économies de la région de l'Afrique du Nord connue par une forte puissance de sa croissance économique. Par ailleurs, la baisse au niveau de la production de l'hydrocarbure au début de l'année 2008 a conduit à un taux de croissance qui a atteint seulement les 4.6%.

Pour l'année 2006, l'apport du secteur agricole a été estimé à 12%, mais sa contribution pour l'année 2007 a été marquée par un faible décroissement qui a atteint une valeur de 10.54%. De plus, la participation du secteur industriel dans le PIB est de 37.4% dont 60% de la production industrielle proviennent des activités manufacturières.

Le secteur industriel est caractérisé par un taux de croissance de la production industrielle pour l'année 2007 qui vaut 4.1%. Cependant, le secteur agricole a été occupé par 18.5% de la population active pour l'année 2007. La valeur de 49% a été enregistrée pour le secteur des services. Enfin, 32.35% de cette population a été évaluée pour le secteur industriel.

Le secteur touristique et le secteur manufacturier ont atteint une part du PIB plus importante que le secteur agricole et le secteur pétrolier. Par ailleurs, la consommation des ménages a été estimée à 8.8% d'accroissement entre l'année 2005 et l'année 2006. Cette consommation représente un potentiel de croissance pour la Tunisie dans la mesure où elle a été évaluée à 63.8% de la part du PIB pour l'année 2006. L'accroissement de la croissance au niveau du secteur touristique et du secteur de l'industrie a été accompagné par une forte amplification au niveau de la consommation énergétique (énergie

primaire). Un tel accroissement est dû aussi à l'amélioration du niveau de vie à la naissance de la population tunisienne au cours des dernières années dans la mesure où l'année 2008 a été caractérisée par un taux d'accroissement de 1.18%. Pour ce qui est des ressources naturelles, la Tunisie est une économie vulnérable à ces richesses. Récemment, elle a enregistré une balance énergétique déficitaire.

**Tab. 1' :** La variation annuelle de la consommation et de la production tunisienne des différentes sources énergétiques.

	1990	1995	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
<b>Pétrole (mille barils par jours)</b>									
Production totale de l'huile	97.71	90.05	80.50	72.58	78.55	77.37	81.67	76.75	78.19
Production de pétrole brute	93.00	88.15	87.67	69.58	75.81	75.00	79.76	75.00	76.44
Consommation	63	70	85	87	88	88	89	90	87
Exportation et importation nette	35	20	-4	-15	-9	-10	-8	-13	-9
<b>Gaz naturel (Milliard de pieds cubiques)</b>									
Production	12	11.7	66.4	79.5	75.9	80.9	84.8	88.3	90.1
Consommation	54	57.6	103.8	135.3	135.6	130.3	130.7	151.9	136.0
Exportation et importation nette	-42.0	-45.9	-42.4	-55.8	-59.7	-49.4	-45.9	-63.6	-45.9
Production nette	5.2	6.9	10.0	10.7	11.1	11.7	12.3	12.6	12.7
Consommation nette	4.6	6.2	8.8	9.5	9.8	10.3	10.7	10.8	10.8
<b>Energie primaire totale</b>									
Production	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Consommation	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3
<b>Electricité (milliard de kilowatt par heures)</b>									
Production nette	5.2	6.9	10.0	10.7	11.1	11.7	12.3	12.6	12.7
Consommation nette	4.6	6.2	8.8	9.5	9.8	10.3	10.7	10.8	10
<b>Les émissions de CO<sub>2</sub> (Les émissions provenant de la consommation de pétrole, de gaz naturel et de charbon)</b>									
	13.06	14.40	19.67	21.43	21.17	20.81	21.12	22.29	20.98

On a présenté dans le tableau (1') ci-dessus suivant les dernières périodes, la variation annuelle de la consommation et de la production tunisienne des

différentes sources énergétiques. En se référant à l'année 2005, on remarque un accroissement au niveau de la consommation énergétique primaire qui a dépassé 8.5 millions de tonnes suite à la production de pétrole brute dont 50% proviennent de la production d'autres issus pétroliers et de gaz naturel qui a joué un rôle fondamental au cours des années 80 [15].

En mettant l'accent sur les énergies renouvelables (le vent, le chauffage d'eau solaire, etc...), on remarque un apport évalué à 46 kilo tonnes dont 0.6% sont équivalents au bilan énergétique primaire pour l'année 2005. Par ailleurs, l'utilisation en matière d'énergie primaire par les différents secteurs industriels n'a pas varié depuis l'année 2000. D'une part, l'utilisation des ménages en matière énergétique est estimée à 29%. D'autre part, on évalue 25% de la consommation pour le secteur de transport, 16% pour le secteur industriel et finalement 4% pour le secteur de l'agriculture [15].

Cependant, parmi les sources énergétiques en Tunisie, on constate que l'exportation de pétrole contribue positivement en termes de valeur pour l'économie tunisienne, bien que cette dernière soit encore incapable de combler les exigences du pays [16].

L'objectif de lutter contre la dégradation environnementale provoquée par les émissions gazeuses, notamment le gaz à effet de serre, est devenu parmi les priorités des politiques économiques en vue d'éviter le réchauffement climatique.

Dans cette étape, on va procéder à une étude de la relation de long-terme qui peut exister entre la pollution de l'air et la croissance économique pour le cas de la Tunisie par l'application d'une étude de cointégration et d'une analyse de l'hypothèse de la CEK. Le choix de la période d'échantillonnage s'est différé d'un indicateur à un autre selon la disponibilité des émissions de gaz à effet de serre :

Études (relation)	Périodes d'échantillonnage
PGDP-PECO <sub>2</sub>	1970-2009
PGDP-PESO <sub>2</sub>	1970-2005
PGDP-PENO <sub>x</sub>	1970-2005

Cette évidence empirique a été inspirée des travaux antérieurs [23-1] et d'autres travaux antérieurs dans ce même domaine de recherche. Le gouvernement tunisien s'est focalisé durant la dernière décennie sur l'amélioration de la qualité de l'environnement dans un contexte de développement durable. On va prendre en considération la nouvelle période entre 2005-2009 pour le cas de CO<sub>2</sub>.

## Matériels et méthodes

### 1. Description des données

Dans cette investigation empirique, la variable endogène relative à la croissance économique est exprimée en fonction du PIB réel par tête au prix constant (en \$) (PGDP). On va introduire comme variables indépendantes : les émissions de CO<sub>2</sub> par tête (PECO<sub>2</sub>), les émissions de dioxyde de sulfate par tête (PESO<sub>2</sub>) et les émissions de dioxyde d'azote par tête (PENOX). Toutes les séries seront transformées en logarithme normal.

Les émissions de gaz à effet de serre sont les résultantes de l'ensemble des actions et des opérations effectuées par l'homme et sont les responsables du réchauffement planétaire et des changements climatiques. Le choix de ces types de polluants se justifie par leur disponibilité dans un grand nombre de pays et ce sont les indicateurs les plus appropriés pour mesurer la dégradation de l'environnement.

Ces émissions polluantes contribuent à des effets directs et particulièrement fâcheux, à savoir, la hausse de la chaleur sur la planète entière, une transformation aboutissant à la variation de précipitations traduite par « plus de précipitations dans les hautes latitudes et moins de pluie dans la plupart des terres subtropicales », des « perturbations atmosphériques » [causées principalement par les émissions de CO<sub>2</sub>], le manque d'humidité conduisant à une augmentation importante des incendies détruisant les milieux naturels [16].

Le CO<sub>2</sub> est le premier responsable du réchauffement planétaire. Chez les adultes, les prodromes qui améliorent le fonctionnement des cycles d'inspiration et d'expiration peuvent être aggravés par le dioxyde de soufre [SO<sub>2</sub>] qui est un gaz susceptible de causer des inflammations douloureuses. Chez les enfants, ce polluant génère des problèmes et des détériorations de la fonction des poumons. Le NO<sub>x</sub> regroupe deux types de gaz à effet de serre relatifs au monoxyde d'azote NO et le dioxyde d'azote NO<sub>2</sub>.

Les variables à utiliser dans cette étude sont présentées sous forme de séries annuelles. Pour la variable relative au PIB réel par tête, on s'est focalisé sur la base de données fournie par la Banque Mondiale (2010) et le Fond Monétaire Internationale (FMI). Pour les séries des émissions de gaz à effet de serre, on s'est basé notamment sur la base de données issue de Global Atmospheric Research (EDGAR).

Les émissions de CO<sub>2</sub>, de SO<sub>2</sub> et de NO<sub>x</sub> sont calculées selon une formule de base adoptée par « the Global Atmospheric Research » incluant différentes sources responsables aux différentes émissions de gaz à effet de serre. On s'est basé sur

les émissions de CO<sub>2</sub> totales générées par les sources suivantes: les autres industries énergétiques - les industries manufacturières et construction - le transport routier - le transport ferroviaire - la navigation intérieure - les autres moyens de transport - les secteurs résidentiels - les émissions fugitives des combustibles solides - les émissions fugitives du pétrole et du gaz - la production de ciment - la production de chaux - la production de produits chimiques - la production de métaux - l'utilisation de solvants et autres produits chimiques - d'autres émissions des sols. Pour les émissions de SO<sub>2</sub> et de NO<sub>x</sub>, elles sont aussi générées par ces mêmes sources en ajoutant: la gestion des émissions des fumiers et la combustion des déchets agricoles. Pour calculer les émissions par tête, on a divisé les émissions totales par la population. La base de données de la population a été fournie par la Banque Mondiale (2011) et par ERS International Macroeconomic Data Set (2010).

Dans le cadre de notre étude (modélisation VAR), où on étudiera la relation de cointégration entre la pollution atmosphérique et la croissance économique, on ne va pas s'intéresser à l'inclusion des autres variables dont l'intégration est fondamentale au niveau des modèles de croissance s'appuyant notamment sur des analyses en coupe instantanée ou sur des données de panel. Par exemple : l'intensité de la libéralisation des échanges commerciaux, la densité de la population, l'intensité de l'activité économique, les investissements directs étrangers, la dette, etc. Une analyse plus approfondie sur le sujet des variables additionnelles du modèle de croissance est illustrée au niveau de l'étude de [11].

Sur la base de la détermination du vecteur autorégressif VAR, on va tester dans ce qui suit la relation de cointégration par la mise en application de la procédure de Johansen en appliquant le test de la trace statistique et le test de maximum de vraisemblance (test de la valeur propre maximale), [34-35]. Cette technique nous amène à l'obtention de deux types de résultats : dans le cas de l'absence de la relation de long-terme entre les séries, la détermination de la direction de causalité de court-terme s'effectue sur la base des séries différenciées dans le modèle VAR (différence première). Cependant, l'obtention d'une relation de cointégration entre les séries justifie la présence d'une relation de long-terme où les tests de causalité se déterminent sur la base du modèle de correction d'erreur (ECM). Dans une étape suivante, on va exprimer les vecteurs de correction d'erreurs (VECM). Une telle étape consiste à une estimation des paramètres de long-terme. Enfin, une dernière étape de cette application sera consacrée à une

vérification de l'hypothèse de la CEK. Dans cette étude, la dimension du vecteur Autorégressif  $X_t$  est 4.

On s'est basé sur la forme générale d'un vecteur stationnaire  $X_t$  de dimension  $[nx1]$  :

$$X_t = (x_t^1, x_t^2, \dots, x_t^n)'$$

En se basant sur nos variables, le vecteur  $X_t$  [5] [23] s'écrit sous la forme suivante :

$$X_t = (\ln PE, \ln PGDP, (\ln PGDP)^2, (\ln PGDP)^3)'$$

Sachant que,  $\ln PE$  désigne le logarithme naturel des émissions polluantes,  $\ln PGDP$  représente le logarithme naturel du PIB réel par tête.

## 2. Méthodologie d'estimation et modèle économétrique

La pollution atmosphérique est expliquée par les polluants émis dans l'atmosphère.

Dans ce cadre, on va analyser l'existence ou non d'une possibilité de relation de long-terme entre les séries. Ensuite, on va procéder à étudier la relation de causalité entre certains polluants et la croissance des deux pays du MENA par la modélisation VAR au niveau individuel en se basant sur la CEK. On va essayer de suivre l'approche méthodologique développée dans ce qui suit.

Soient les deux hypothèses suivantes  $H_0$  et  $H_1$  :

$$\begin{cases} H_0 : \text{non, stationnarité} \\ H_1 : \text{stationnarité} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} H_0 : \theta = 0 \Rightarrow r = 1 \\ H_1 : |\theta| < 0 \Rightarrow r = 0 \end{cases}$$

La modélisation du vecteur  $X_t$  sous la forme d'un vecteur autorégressif VAR d'ordre (p) s'écrit sous cette forme :

$$X_t = C + \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \dots + \phi_p X_{t-p} + \varepsilon_t \quad (1)$$

$\varepsilon_t$  désigne une matrice diagonale des résidus. On peut réécrire l'équation (1) sous la forme suivante :

$$X_t = C + \phi_1 \Delta X_{t-1} + \phi_2 \Delta X_{t-2} + \dots + \phi_{p-1} \Delta X_{t-p+1} + \Pi X_{t-1} + \varepsilon_t \quad (2)$$

Dans le cas où le nombre de vecteur(s)  $r$  est inférieur à  $k$ , on peut identifier donc  $(k \times r)$  matrice(s)  $\alpha$  et  $\beta$  dont le rang de chacune d'elles est évalué à  $r$  avec  $\Pi = \alpha\beta'$  sachant que  $\beta'X_t$  est  $I(0)$ . Dans cette modélisation VAR,  $\Pi X_t$  désigne la relation de long-terme dans le modèle de correction d'erreurs sachant que les  $\alpha$  définissent les paramètres d'ajustement dans ce modèle. Chaque vecteur de cointégration est exprimé en fonction d'une colonne de  $\beta$ .

La causalité est déterminée suivant deux origines particulières: soit à travers les termes dynamiques retardés ce qui justifie la dynamique de court-terme, soit en obtenant un coefficient  $\alpha \neq 0$  où le sens de causalité est déterminé à travers les termes d'erreurs ( $\phi_1, \phi_2, \dots$ ) du modèle de correction d'erreurs ce qui explique la dynamique de long-terme.

En utilisant des méthodes économétriques spécifiques, la causalité au sens de Granger peut se déterminer aussi par le biais du test d'exogénéité faible [6]. Les résultats relatifs aux tests de stationnarité des séries, seront présentés au niveau du tableau (1).

Dans le cadre de l'analyse de la CEK, l'équation représentative de la relation de long-terme liant la croissance économique à la pollution de l'air causée par les émissions polluantes est illustrée suivant une fonction algorithmique cubique en se référant à la démarche suivie par [23]. Selon [26], il est à noter que le choix des variables transformées en logarithme normale est justifié par la pertinence des résultats à obtenir (résultats significatifs). Dans leur article [23] se sont basés sur une transformation des variables du modèle en logarithme normale en vue de présenter la relation entre le niveau de revenu et la pollution suivant une forme fonctionnelle algorithmique dont les résultats sont plus significatifs. Ce choix était justifié par l'absence des revues antérieures traitant le choix des variables dans le cadre de la courbe de Kuznets.

Au niveau de cette troisième équation se présentera les émissions polluantes (PE) en fonction du PIB dans le cadre de la CEK :

$$\ln PE_t = \theta_0 + \theta_1 (\ln PGDP_t) + \theta_2 (\ln PGDP_t)^2 + \theta_3 (\ln PGDP_t)^3 + \varepsilon_t \quad (3)$$

Avec,

$$\ln PE \Rightarrow \begin{cases} \ln PEC O_2 \\ \ln PES O_2 \\ \ln PEN O_x \end{cases}$$

C'est à travers les signes des coefficients  $\theta$  de l'équation (3) qu'on peut identifier les différentes formes de la courbe de Kuznets traitant la relation Croissance-Environnement. Dans ce cas, trois résultats sont valables :

- Relation ayant la forme d'un N : si  $\theta_1 > 0$ ,  $\theta_2 < 0$  et  $\theta_3 > 0$ .
- Relation ayant la forme d'un N-inversé : si  $\theta_1 < 0$ ,  $\theta_2 > 0$  et  $\theta_3 < 0$ .
- Relation ayant la forme d'un U : si  $\theta_1 < 0$ ,  $\theta_2 > 0$  et  $\theta_3 = 0$ .
- Relation ayant la forme d'un U-inversé :  $\theta_1 > 0$ ,  $\theta_2 < 0$  et  $\theta_3 = 0$ .

**Tab. 1 :** Résultats des tests de racine unitaire

	Variables	ADF test [1]	
		Constante	Constante et tendance
En niveau	Ln(PECO <sub>2</sub> )	-0.914	-0.723
	Ln(PESO <sub>2</sub> )	-2.357	-1.103
	Ln(PENOX)	-2.781*	-2.561
	Ln(PGDP)	-0.904	-2.377
	(LnPGDP) <sup>2</sup>	-0.508	-1.852
	(LnPGDP) <sup>3</sup>	-0.100	-1.365
	Δ(lnPECO <sub>2</sub> )	-5.809***	-6.256***
	Δ(lnPESO <sub>2</sub> )	-5.806***	-6.721***
	Δ(lnPENOX)	-8.542***	-8.875***
	Δ(lnPGDP)	-6.716***	-6.613***
	Δ(lnPGDP) <sup>2</sup>	-6.690***	-6.598***
	Δ(lnPGDP) <sup>3</sup>	-6.616***	-6.570***
En différence	Variables	PP test [1]	
		Constante	Constante et tendance
	Ln(PECO <sub>2</sub> )	-1.094	-0.653
	Ln(PESO <sub>2</sub> )	-2.456*	-0.943
	Ln(PENOX)	-2.619*	-2.279
	Ln(PGDP)	-0.904	-2.527
	(LnPGDP) <sup>2</sup>	-0.508	-2.041
	(LnPGDP) <sup>3</sup>	-0.099	-1.561
	Δ(lnPECO <sub>2</sub> )	-5.809***	-6.426***
	Δ(lnPESO <sub>2</sub> )	-5.822***	-6.719***
	Δ(lnPENOX)	-8.542***	-16.816***
	Δ(lnPGDP)	-6.765***	-6.653***
En différence	Variables	KPSS test [2]	
		Constante	Constante et tendance
	Ln(PECO <sub>2</sub> )	0.171***	0.171**
	Ln(PESO <sub>2</sub> )	0.508**	0.179**
	Ln(PENOX)	0.375*	0.196**
	Ln(PGDP)	0.776***	0.122*
	(LnPGDP) <sup>2</sup>	0.774***	0.133*
	(LnPGDP) <sup>3</sup>	0.772***	0.143*
	Δ(lnPECO <sub>2</sub> )	0.355	0.112
	Δ(lnPESO <sub>2</sub> )	0.460	0.054
	Δ(lnPENOX)	0.277	0.127
	Δ(lnPGDP)	0.204	0.200
	Δ(lnPGDP) <sup>2</sup>	0.197	0.201
	Δ(lnPGDP) <sup>3</sup>	0.210	0.202

NOTE : (\*\*\*) : signification au seuil de 1%, (\*\*) : signification au seuil de 5% et (\*) : signification au seuil de 10%. Δ : consiste à la différence première des variables de la série. (1) : Le test d'ADF et le test de PP se basent sur les hypothèses suivantes :

$$\begin{cases}
 H_0 : \text{hypothèse, nulle} \Rightarrow \text{non, stationnarité, des, variables} \\
 H_1 : \text{hypothèse, alternative} \Rightarrow \text{stationnarité, des, variables}
 \end{cases}
 \Rightarrow
 \begin{cases}
 H_0 : \theta = 0 \Rightarrow \text{présence, d'une, racine, unitaire} \Rightarrow r = 1 \\
 H_1 : |\theta| < 0 \Rightarrow \text{absence, d'une, racine, unitaire} \Rightarrow r = 0
 \end{cases}$$

(2) : Pour le test de KPSS, il s'est basé notamment sur l'hypothèse  $H_0$  relative à la stationnarité des variables et vice versa pour l'hypothèse  $H_1$ .

Pour calculer le point tournant de la CEK, il suffit d'établir la formule suivante :

$$\hat{\tau} = \exp(-0.5\hat{\theta}_1 / \hat{\theta}_2)$$

Ce sont les signes des coefficients  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  et  $\theta_3$  qui vont nous permettre de savoir s'il s'agit d'une relation monotone croissante ou décroissante, il en résulte deux cas:

\* Pour le cas où  $\theta_1 > 0$  et  $\theta_2 = \theta_3 = 0$  : la relation liant la croissance économique à la qualité de l'environnement est une fonction linéaire croissante et monotone.

\* Pour le cas inverse où  $\theta_1 < 0$  et  $\theta_2 = \theta_3 = 0$  : la relation liant la croissance économique à la qualité de l'environnement est une fonction linéaire décroissante et monotone.

Avant de procéder à l'interprétation des résultats des tests de stationnarité, il est nécessaire d'établir l'ordre (p) du processus VAR pour les différentes relations.

On retiendra par la suite le processus VAR dont les deux critères d'information d'Akaike (AIC), Schwarz (SIC) et de log-vraisemblance (LV) les plus faibles. Les résultats obtenus seront classifiés dans le tableau (2).

## Résultats et discussion

Avant de procéder aux différents tests de cointégration afin de détecter la présence ou non d'une relation de long-terme entre la série du PIB (en logarithme naturel) et les différentes séries des émissions polluantes (en logarithme naturel), il s'agit dans un premier temps de vérifier la stationnarité de ces séries en première différence. Le tableau (1) nous montre que toutes les séries du modèle sont non stationnaires en niveau donc elles possèdent une racine unitaire à ce niveau. En revanche, les tests d'ADF, de PP et de KPSS nous montrent que l'hypothèse  $H_1$  devrait être acceptée en première différence ce qui prouve qu'il s'agit des séries  $I(0)$  (intégrées d'ordre 0) à ce niveau.

Dans ce cadre, nous concluons que les différentes séries sont  $I(1)$  (intégrées d'ordre (1)) en niveau. Après avoir vérifié la stationnarité des variables en première différence, on pourra donc procéder à l'application des tests de cointégration pour le cas de la Tunisie par le biais de la procédure de Johansen suivant deux tests spécifiques de maximum de vraisemblance, à savoir, le test de la statistique de la trace et le test de la valeur propre maximale et ce dans le but de déterminer le nombre de vecteurs de cointégration reflétant dans ce sens le nombre de relations sur la longue période. Les résultats des tests de long-terme seront illustrés au niveau de la série des tableaux suivants : tableau (3-a), tableau (3-b) et tableau (3-c).



**Tab. 3-a :** Résultats des tests de cointégration de Johansen (1995) pour les émissions de CO<sub>2</sub>

Hypothèses Tests de Cointégration	H <sub>0</sub> / H <sub>1</sub>	
	$r=0/r \geq 1$	$r \leq 1/r=2$
Statistique de la trace $\lambda_{trace}$	105.35**	33.884**
Valeur critique (VC)	47.856	29.797
Probabilité	0.0000	0.0160
Statistique de la VPM $\lambda_{max}$	71.463**	21.819**
Valeur critique (VC)	27.584	21.132
Probabilité	0.0000	0.0400
<b>Tests de Cointégration</b>	<b><math>r \leq 2/r=3</math></b>	<b><math>r \leq 3/r=4</math></b>
Statistique de la trace $\lambda_{trace}$	12.065	0.0411
Valeur critique (VC)	15.495	3.8415
Probabilité	0.1538	0.8394
Statistique de la VPM $\lambda_{max}$	12.024	0.0411
Valeur critique (VC)	14.265	3.8415
Probabilité	0.1097	0.8394

**Tab. 3-b :** Résultats des tests de cointégration de Johansen (1995) pour les émissions de SO<sub>2</sub>

Hypothèses Tests de Cointégration	H <sub>0</sub> / H <sub>1</sub>	
	$r=0/r \geq 1$	$r \leq 1/r=2$
Statistique de la trace $\lambda_{trace}$	121.44**	41.426**
Valeur critique (VC)	47.856	29.797
Probabilité	0.0000	0.0015
Statistique de la VPM $\lambda_{max}$	80.015**	26.056**
Valeur critique (VC)	27.584	21.132
Probabilité	0.0000	0.0093
<b>Tests de Cointégration</b>	<b><math>r \leq 2/r=3</math></b>	<b><math>r \leq 3/r=4</math></b>
Statistique de la trace $\lambda_{trace}$	15.370	0.7052
Valeur critique (VC)	15.495	3.8415
Probabilité	0.0522	0.4011
Statistique de la VPM $\lambda_{max}$	14.665**	0.7052
Valeur critique (VC)	14.265	3.8415
Probabilité	0.0432	0.4011

L'identification de la relation de long-terme s'est basée sur la série des hypothèses suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} H_0 : r = 0 \\ H_1 : r \geq 1 \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} H_0 : r \leq 1 \\ H_1 : r = 2 \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} H_0 : r \leq 2 \\ H_1 : r = 3 \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} H_0 : r \leq 3 \\ H_1 : r = 4 \end{array} \right\}$$

Suivant la mise en pratique d'une structure séquentielle, les deux tests dont s'est fondée la procédure de Johansen se sont basés sur les mêmes séries d'hypothèses selon un même principe de définition de ces hypothèses tout en passant d'un nombre de vecteurs de cointégration égale à 0 à un nombre égale à 4. En effet, la première hypothèse nulle H<sub>0</sub> se définit par l'absence de vecteurs de cointégration ( $r=0$ ) contre une hypothèse alternative H<sub>1</sub> relative à la présence d'au moins un seul vecteur de cointégration ( $r \geq 1$ ).

**Tab. 3-c :** Résultats des tests de cointégration de Johansen (1995) pour les émissions de NO<sub>x</sub>

Hypothèses Tests de Cointégration	H <sub>0</sub> / H <sub>1</sub>	
	$r=0/r \geq 1$	$r \leq 1/r=2$
Statistique de la trace $\lambda_{trace}$	118.84**	45.046**
Valeur critique (VC)	47.856	29.797
Probabilité	0.0000	0.0004
Statistique de la VPM $\lambda_{max}$	73.797**	31.633**
Valeur critique (VC)	27.584	21.132
Probabilité	0.0000	0.0012
<b>Tests de Cointégration</b>	<b><math>r \leq 2/r=3</math></b>	<b><math>r \leq 3/r=4</math></b>
Statistique de la trace $\lambda_{trace}$	13.414	0.0260
Valeur critique (VC)	15.495	3.8415
Probabilité	0.1005	0.8719
Statistique de la VPM $\lambda_{max}$	13.388	0.0260
Valeur critique (VC)	14.265	3.8415
Probabilité	0.0684	0.8719

NOTE : (1) VPM désigne la valeur propre maximale. (\*\*) Désigne la significativité au seuil de 5% où on rejette l'hypothèse H<sub>0</sub> au niveau de ce seuil (5%).

(2) les valeurs critiques obtenues à partir de ces deux tests correspondent aux plus-values de Mackinnon (1999).

Cette dernière sera acceptée si la statistique de la trace ou la statistique de la valeur propre maximale (respectivement  $\lambda_{trace}$  et  $\lambda_{max}$ ) est supérieure aux valeurs critiques obtenues. Pour un deuxième niveau d'estimation, l'hypothèse nulle H<sub>0</sub> se définit par l'existence d'un seul vecteur de cointégration ( $r \leq 1$ ) contre une hypothèse alternative H<sub>1</sub> relative à la présence d'au moins deux vecteurs de cointégration ( $r=2$ ) (la même démarche sera appliquée pour les hypothèses de la 3<sup>ème</sup> et la 4<sup>ème</sup> estimation). Le nombre de retards (p) optimal choisi et établi pour chaque relation de cointégration a été sélectionné selon les critères d'information d'AIC et de SIC dont les résultats sont exposés avec détail au niveau du tableau (2) (on a remarqué d'après ces résultats que le nombre de retards optimal est égal à 4, voir tableau (2). Il est à noter que selon [26] l'approche de Johansen dans notre étude s'est fondée notamment sur l'intégration de la constante et de la tendance. L'ensemble des tableaux relatifs aux résultats des tests de cointégration entre la série du PIB et les séries des émissions polluantes pour la Tunisie montrent que l'Hypothèse nulle H<sub>0</sub> a été rejetée au niveau de 5% pour les trois cas selon le test de statistique de la trace et le test de la valeur propre maximale.

Le nombre de vecteurs de cointégration pour le cas de la Tunisie pour les différentes relations (PGDP/PECO<sub>2</sub> - PGDP/PESO<sub>2</sub> - PGDP/PENOX) est

évalué à 2 (deux relations de long-terme). Les résultats des équations relatives aux vecteurs de CI et des coefficients d'ajustement déterminés à travers l'écriture du vecteur du modèle de correction d'erreurs (VECM) se situent au niveau du tableau (4).

**Tab. 4 :** Illustration des vecteurs de cointégration (PGDP/PECO<sub>2</sub> - PGDP/PESO<sub>2</sub> - PGDP/PENOX)

LM test statistic (1)	Joint Jarque-Bera test statistic (2)	$\alpha_i$ (3)
28.3657** (0.0286)	10.6361*** (0.0049)	-0.1885 (-1.9762**)
32.2083*** (0.0094)	1.4241 (0.4906)	-0.4166 (-2.7849***)
19.1652 (0.2602)	1.0726 (0.5849)	-0.1805 (-3.7919***)

NOTE : (1) : LM test statistic, désigne le test statistique de corrélation des séries (pour le nombre de retard  $p=4$ ), il se base sur les l'hypothèse nulle  $H_0$  relative à l'absence de corrélation des séries et l'hypothèse alternative  $H_1$  relative à la présence de corrélation des séries. (2) : Joint Jarque-Bera test statistic c'est le test statistique de normalité des résidus pour le nombre de retard  $p=4$ , il se base sur les deux hypothèses suivantes : ( $H_0$  : les données suivent une loi normale et  $H_1$  : les données ne suivent pas une loi normale). (3) :  $\alpha_i$  désigne le terme de correction d'erreur de chaque émission polluante. (4) : (\*\*\*) : significativité au seuil de 1% ; (\*\*) : significativité au seuil de 5% et (\*) : significativité au seuil de 10%. (5) : pour les deux tests de LM et de Joint Jarque-Bera désignent les probabilités.

Avec les équations de cointégration sont les suivantes :

$$\ln PECO_2 = -16.0673 \ln PGDP + 4.001 (\ln PGDP)^2 - 0.2569 (\ln PGDP)^3$$

(-8.6746\*\*\*)                      (8.0470\*\*\*)                      (-7.6909\*\*\*)

$$\ln PESO_2 = -30.4703 \ln PGDP + 7.9690 (\ln PGDP)^2 - 0.5427 (\ln PGDP)^3$$

(-6.8954\*\*\*)                      (6.9379\*\*\*)                      (-6.9684\*\*\*)

$$\ln PENOX = -7.2831 \ln PGDP + 1.5140 (\ln PGDP)^2 - 0.1035 (\ln PGDP)^3$$

(-9.4195\*\*\*)                      (7.9707\*\*\*)                      (-7.4246\*\*\*)

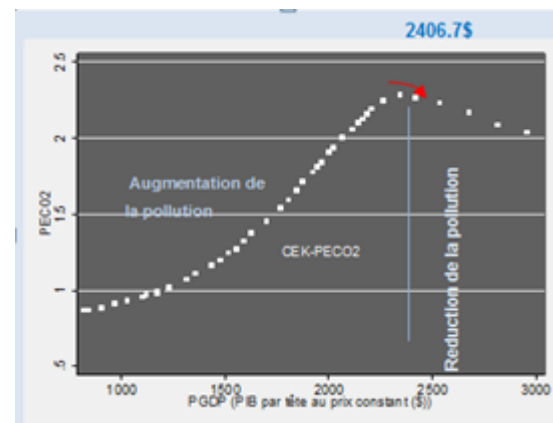
Les résultats du test de corrélation des séries (LM) nous indiquent, qu'on on accepte l'hypothèse  $H_0$  pour les deux premières équations (respectivement au seuil de 5% et 1%) et on la rejette pour la dernière équation. Par ailleurs, le deuxième test de Joint Jarque-Bera, montre que l'hypothèse  $H_0$  est acceptée que pour la première équation au seuil de 1% tandis que pour les deux dernières équations les résidus ne sont pas Gaussiens.

De plus, au niveau du tableau (4) illustrant les vecteurs de cointégration, on remarque que tous les coefficients des vecteurs de la relation de long-terme sont significatifs. Les signes des coefficients des vecteurs de CI (cointégration) nous montrent une relation ayant la forme d'un N-inversé pour les trois cas d'étude : PGDP/PECO<sub>2</sub> - PGDP/PESO<sub>2</sub> - PGDP/PENOX ( $\theta_1 < 0$ ,  $\theta_2 > 0$  et  $\theta_3 < 0$ ). En revanche, en résolvant les équations de ce modèle (détermination des racines) et d'après la schématisation de l'allure de la CEK au niveau de la

liste des illustrés ci-dessous on observe une relation ayant la forme d'un U-inversé suivant deux phases spécifiques dont la première est caractérisée par un accroissement des émissions suivie par une autre phase descendante où la qualité de l'environnement s'est améliorée à un certain niveau du PIB pour le cas des émissions de SO<sub>2</sub> et de NOx tandis que pour le cas des émissions de CO<sub>2</sub>, on observe une longue phase croissante (34 ans) suivie d'un décroissement des niveaux des émissions pour les cinq dernières observations de cette étude.

Dans le même cadre d'analyse, et à la suite de l'observation de ces représentations pour le cas de la Tunisie, on parvient à conclure que la CEK est confirmée pour le cas des émissions de SO<sub>2</sub> par tête et de NOx par tête. Aussi pour le cas des émissions carboniques (CO<sub>2</sub>), cette hypothèse de la CEK est confirmée dans notre étude mais on ne peut pas actuellement estimer la nature de l'évolution de ces émissions (accroissement ou décroissement) après l'année 2009. Dans ce cadre, il est possible que des études antérieures sur la relation des émissions de CO<sub>2</sub> et la croissance économique en Tunisie puissent préciser la tendance de l'évolution de l'allure de la CEK dans la période à venir.

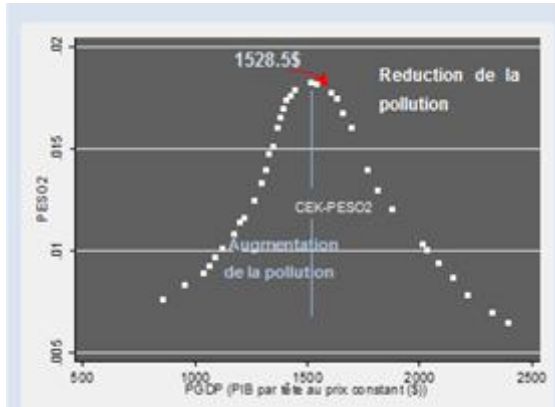
En effet, pour le premier cas correspondant à la relation entre les émissions carboniques et le niveau atteint du produit intérieur brut, on présente cette relation dans la figure 2.



**Fig.2 :** Courbe Environnementale de Kuznets de la relation PIB-CO<sub>2</sub> (PGDP-PECO<sub>2</sub>)

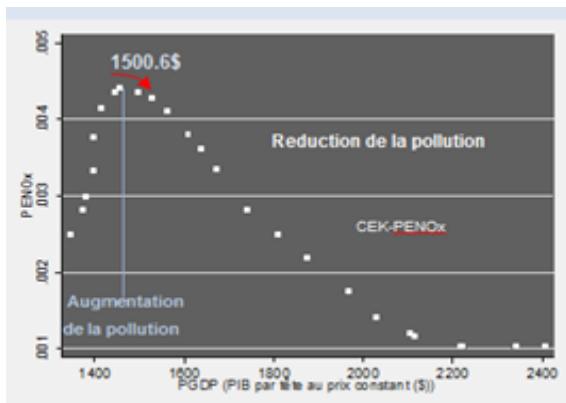
On remarque que le point tournant de la CEK-PECO<sub>2</sub> à partir duquel un décroissement du niveau de ces émissions a été observé et relatif d'une manière plus au moins précise à un niveau de PIB réel par tête évalué à 2406.7\$ soit l'équivalent de 6444.8\$ (en parité de pouvoir d'achat (PPA) au prix constant de 2005). Un tel niveau du PIB a été réalisé en Tunisie en 2005. Pour le cas des émissions de dioxyde de sulfate, avec l'atteinte d'un niveau approximatif de 1528.5\$ relatif à un montant de 4093.2\$ (en PPA au prix constant de 2000), les

émissions de  $\text{SO}_2$  commencent à décroître où la CEK entame une deuxième phase descendante définie par une atténuation de la dégradation de l'environnement dont ce plafond définit le point tournant dans la CEK- $\text{PESO}_2$  ce qui est présenté dans la figure 3.



**Fig.3 :** Courbe Environnementale de Kuznets de la relation PIB- $\text{SO}_2$  (PGDP- $\text{PESO}_2$ )

C'était au commencement des années 90 que le PIB de la Tunisie a progressé jusqu'à ce niveau. Enfin, pour le cas des émissions d'azote, le niveau du PIB par habitant au prix constant atteint suivant lequel ces émissions commencent à décroître dans la CEK- $\text{PENOX}$  est évalué approximativement à 1500.6\$ et qui est, dans une comparaison, similaire à 4018,6\$ (PPA au prix constant de 2005). Cette relation est présentée dans la figure(4) la suivante :



**Fig.4 :** Courbe Environnementale de Kuznets de la relation PIB- $\text{NO}_x$  (PGDP- $\text{PENOX}$ )

C'est au début des années 90 que la Tunisie a réussi à maîtriser ses émissions et les atténuer dans le but de la réalisation des stratégies de développement durable. La schématisation de la CEK respectivement pour le cas des émissions de  $\text{SO}_2$  et de  $\text{NO}_x$  par tête montrent que la Tunisie est arrivée à maîtriser les niveaux de ces trois polluants de l'air au début des années 90, notamment en 1990 pour le dioxyde d'azote, en 1991 pour les émissions de

dioxyde de sulfate et en 1996 pour le cas des émissions carboniques.

Dans le modèle de correction d'erreur, les paramètres  $\alpha_i$  obtenus mesurent la vitesse d'ajustement vers le niveau d'équilibre de long-terme. En analysant les résultats dans le tableau (4) tous les paramètres sont de signes négatifs et statistiquement significatifs au seuil de 5% (-0.1885) pour le cas des émissions de  $\text{CO}_2$  et au seuil de 1% pour les deux autres polluants (-0.4166) et (-1.8053) ce qui est dû notamment à la présence d'un processus de correction d'erreur. Dans le même cadre, on observe les mêmes résultats pour le cas de la Tunisie avec des paramètres qui sont aussi de signes négatifs et significatifs au seuil de 5% (-0.1336) pour le cas des émissions carboniques par habitant et au seuil de 1% (-0.1350) et (-0.1691) respectivement pour les émissions de  $\text{SO}_2$  par tête et de  $\text{NO}_x$  par tête dus à la présence d'un processus de correction d'erreur pour les deux pays.

À la suite de l'observation des résultats du VMCE, on parvient à conclure que la prise en considération de la technique de correction d'erreur pour le cas de la Tunisie est essentielle du fait qu'un changement suivant une variation vers l'équilibre de long-terme aura un effet suffisamment important (significatif) sur la croissance et l'évolution des émissions polluantes.

La spécificité de la structure d'ajustement vers l'équilibre de long-terme s'est différée d'une relation à une autre. Les vitesses d'ajustement pour le cas de la Tunisie sur une période d'un an se sont évaluées respectivement à 18.85%, 41.66% et 18.05% où elles prennent respectivement 5.31 ans, 2.40 ans et 5.54 ans pour se retrouver en position d'équilibre lors d'un choc d'une innovation ayant certains effets sur la structure de la relation entre les variables.

Dans le but d'identifier la nature de la relation liant la croissance économique à la pollution atmosphérique, un nouveau principe pour la relation de causalité a été créé et généralisé par Granger (1969) connu sous l'appellation de lien de causalité dans le sens de Granger. En d'autre terme, si on possède deux séries  $Y_t$  et  $X_t$  ce test de causalité nous permet de savoir si la série  $Y_t$  cause au sens de Granger la série  $X_t$  et de montrer le degré de capacité des valeurs passées de  $X_t$  à expliquer la valeur actuelle de  $Y_t$ , (dans notre cas d'étude :  $Y_t$  désigne la série de PIB réel par tête et  $X_t$  représente les séries des émissions polluantes. Le test de Granger s'est appliqué dans ce cas sur la différence première de chaque série.)

Dans notre cas d'étude,  $Y_t$  désigne le PIB réel par tête et  $X_t$  désignent les séries des émissions polluantes.

L'application de la procédure de Granger dans le but de l'identification du sens de causalité de long-terme s'effectuera par le biais du test d'exogénéité faible pour détecter le sens de causalité de long-terme sur la base de l'hypothèse suivante :

$$T_i : H_0 : \alpha_i = 0 \Rightarrow \text{avec}, i = 1, 2$$

On définit  $\alpha_i$  par les coefficients d'ajustement dans le modèle de correction d'erreur (ECM),  $T_i$  sont relatifs aux tests d'exogénéité faible de la croissance économique et des émissions polluantes ( $i = 1, 2$ ), dans la mesure où les émissions englobent les émissions de  $\text{CO}_2$  par tête, de  $\text{SO}_2$  par tête et de  $\text{NO}_x$  par tête. Cependant, un autre test de Wald sera appliqué en vue de déterminer les liens de causalité sur le court-terme.

L'identification des sens de causalité de Granger s'est fondée sur les hypothèses suivantes :

$$\begin{cases} H_0 : \Delta \ln PGDP_{ne\_cause\_pas} - \Delta \ln PE \\ H_0 : \Delta \ln PE_{ne\_cause\_pas} - \Delta \ln PGDP \end{cases}$$

Avec,

$$\Delta \ln PE \Rightarrow \begin{cases} \Delta \ln PECO_2 \\ \Delta \ln PESO_2 \\ \Delta \ln PENOX \end{cases}$$

Les résultats des tests de Granger seront exposés dans le tableau (5) le suivant :

**Tab. 5 : Résultats des tests de causalité de Granger**

Tunisie	Wald test :	Exogeneity test :
Hypothèses	Test de causalité de court-terme	Test de Causalité de long-terme
$H_0 : \Delta \ln PGDP_{ne\_cause\_pas} - \Delta \ln PECO_2$	20.6135***	2.1018*
$H_0 : \Delta \ln PECO_2_{ne\_cause\_pas} - \Delta \ln PGDP$	15.4199**	0.3055
$H_0 : \Delta \ln PGDP_{ne\_cause\_pas} - \Delta \ln PESO_2$	15.7997** 4.6377***	
$H_0 : \Delta \ln PESO_2_{ne\_cause\_pas} - \Delta \ln PGDP$	6.7631	0.2809
$H_0 : \Delta \ln PGDP_{ne\_cause\_pas} - \Delta \ln PENOX$	13.6500** 2.9746**	
$H_0 : \Delta \ln PENOX_{ne\_cause\_pas} - \Delta \ln PGDP$	13.1670**	0.9743

NOTE : (1) : (\*\*\*) : signification au seuil de 1% ; (\*\*) : signification au seuil de 5% et (\*) : signification au seuil de 10%. (2) : Le test de Wald permet d'identifier le sens de causalité de court-terme et le test d'exogénéité faible aboutit à l'identification de la direction de causalité de long-terme, ce test s'effectue en se basant sur les tests de vraisemblance. (3) : On obtient les mêmes résultats au niveau des tests de Granger de court et de long-terme pour les variables du PIB au carré  $\Delta \ln(PGDP)^2$  et du PIB au cube  $\Delta \ln(PGDP)^3$ .

## Conclusion

Dans ce papier, nous avons étudié la relation entre la croissance économique et la dégradation de l'environnement générées par les émissions de gaz à effet de serre où on s'est basé sur l'analyse de la CEK pour le cas de la Tunisie sur la période 1970-2009/1970-2005 suivant une modélisation VAR. Dans ce sens et dans le but d'étudier la relation de cointégration entre les séries, notre analyse s'est fondée sur une démarche économétrique suivant des données chronologiques. Les résultats économétriques montrent que l'hypothèse de la CEK est confirmée pour le cas des trois relations suivant la forme d'un U-inversé à différents niveaux de revenu bien que les résultats économétriques des estimations de la relation de cointégration ont indiqué une relation ayant une forme d'un N-inversé.

En effet, le montant du PIB suivant lequel les émissions de  $\text{CO}_2$  commencent à décroître est évalué approximativement à 2406.7\$ soit l'équivalent de 4669,6\$ (en parité de pouvoir d'achat (PPA) au prix constant de 2005). On ne peut pas actuellement estimer la nature de l'évolution de ces émissions (accroissement ou décroissement) après l'année 2009. Dans ce cadre il est possible que des études antérieures sur la relation des émissions de  $\text{CO}_2$  et la croissance économique en Tunisie puissent préciser l'évolution de l'allure de la CEK dans la période à venir.

Le point tournant de la CEK-PESO<sub>2</sub> suivant lequel la Tunisie a pu maîtriser ses émissions de  $\text{SO}_2$  a été estimé à 1528.5\$ relatif à un montant de 4093,2\$ (en parité de pouvoir d'achat (PPA) au prix constant de 2005). Pour le cas des émissions de  $\text{NO}_x$  par tête, une nouvelle phase décroissante a été enregistrée au niveau de CEK-PENOX lorsque le PIB réel par tête a atteint un niveau de 1500.6\$, qui est dans une comparaison, similaire à 4018,6\$.

Ces trois niveaux du PIB ont été atteints au début des années 90, (1990, 1991 et 1996). Pour le cas des émissions de dioxyde de sulfate, les résultats obtenus dans cette investigation empirique ne sont pas surprenants dans la mesure où, à un certain seuil maximal de PIB, ces émissions s'atténuent au cours du temps. En comparaison avec les émissions de  $\text{CO}_2$ , dont l'effet est néfaste sur la population mondiale, les émissions de  $\text{SO}_2$  ne possèdent qu'une influence directe sur la population régionale. De plus, l'activité économique en Tunisie se base notamment sur des sources d'émissions polluantes, qui sont assez limitées, et sur des investissements à forte capacité de contrôle de la concentration des produits nocifs pour l'environnement.

Pour généraliser, l'incitation du gouvernement tunisien, en favorisant un cadre institutionnel et

réglementaire favorable à la protection de la qualité de l'environnement et à la maîtrise de la consommation énergétique, était la priorité des années 80 en matière de lutte contre le réchauffement planétaire, ce qui explique notamment la deuxième phase décroissante de la CEK-PESO<sub>2</sub> et de la CEK-PENO<sub>x</sub>. Une telle priorité a été traduite par l'adoption d'une politique volontariste de maîtrise de la consommation de l'énergie (l'une des origines de la pollution atmosphérique) et par la promotion des sources énergétiques renouvelables dans un contexte d'amélioration et d'accroissement de l'activité économique.

En prévoyant le renforcement des actions de la prévention de la qualité de l'environnement, la Tunisie a ratifié la Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) en 1993 et du protocole de Kyoto en 2002 [4] (dont l'acceptation de la ratification était le 22 janvier 2003). D'autant plus, dans le contexte de la consolidation de ses efforts en matière de lutte contre la dégradation environnementale et de réduction des émissions de gaz à effet de serre, une coopération entre la Tunisie et le Canada a eu lieu à l'occasion des accords internationaux sur la préservation d'un environnement sain, dans le domaine d'exportation du savoir-faire technique des pays industrialisés vers les pays en développement. [20]

Pour ce qui est de la CEK-PECO<sub>2</sub>, c'est au début de l'année 1996 que la Tunisie a pu maîtriser les émissions de CO<sub>2</sub> et a été considérée comme une bonne justification des efforts focalisés par les autorités tunisiennes tout au long des années 80 et 90.

Dans la région MENA, on prévoit une augmentation des émissions carboniques qui seront provoquées par la production d'électricité. Il est à [26] qu'en 2030, les émissions de CO<sub>2</sub> issues de l'utilisation énergétique vont passer de 34% à 36%.

Dans le cadre de la gestion des émissions de gaz à effet de serre et la lutte contre leurs effets potentiels et néfastes sur les changements climatiques mondiaux, la Tunisie opte pour une stratégie axée sur plusieurs actions bien déterminées : i- prévenir, éliminer et limiter l'émission de gaz nocifs dans l'atmosphère ; ii- identifier et contrôler les secteurs et les régions susceptibles de connaître de graves problèmes de pollution atmosphérique ; iii- procéder aux inventaires d'énergie en vue de réaliser des économies d'énergie et limiter la pollution qui en découle, iv- instaurer et développer la gestion équilibrée de la qualité de l'air. Ces points sont développés selon la stratégie nationale dans le

cadre de l'environnement et du développement durable en Tunisie.

Parmi les programmes et les outils opérationnels optés par le ministère de l'environnement et de développement durable en vue d'appliquer une telle stratégie, la fixation des normes et des standards de contrôle des émissions était une action prioritaire en encourageant le recours aux sources énergétiques renouvelables non polluantes et ce par l'utilisation de carburants propres et l'acquisition d'équipements pour l'achèvement de l'activité productive avec une haute qualité et une faible intensité polluante, (...).

En particulier, la Tunisie s'est intéressée à la mise au point de stratégies spécifiques en vue de réduire les émissions de SO<sub>2</sub> et de NO<sub>x</sub>. Parmi les séries d'actions on peut citer : i- le projet de réduction de la pollution atmosphérique par les usines de l'industrie chimique de Gabès durant la période (1982-1997) ; ii- la fermeture de trois usines à forte intensité polluante en 1990, à Sfax, Mahdia et Mégrine ; iii- l'installation de filtres dans les centrales électriques, la cimenterie, la sidérurgie, les fonderies et autres industries avec un coût total évalué à 4,4 millions de dinars, dont 20% sous forme de subventions provenant du fond de réduction de la pollution (FODEP, 1995) [16].

Le gouvernement tunisien continue ses efforts en matière de contrôle de la qualité environnementale, il en résulte par la suite la mise en application du 10<sup>ème</sup> plan tunisien pour le développement relatif à la période (2002-2006) suivant des mesures préparatoires dans un contexte de développement durable. Ce plan d'action s'est fondé sur quatre piliers spécifiques : i- l'intégration de la dimension environnementale dans le processus de développement, ii- la mise en disposition de moyens mis en œuvre pour la préservation de l'ensemble des richesses minérales, forestières et énergétiques et la lutte contre la désertification, iii- l'apport d'une amélioration considérable du niveau de vie et de la lutte contre la dégradation de la qualité de l'environnement par la mise en œuvre de moyens appropriés et iv- la contribution de l'environnement au développement économique dans toutes ses dimensions [15].

Pour compléter l'analyse des résultats de cointégration et les interpréter économiquement, nous avons appliqué le test de causalité de Granger (test d'exogénéité faible) sur le modèle de correction d'erreur pour déterminer les sens de causalités entre la croissance économique et la dégradation environnementale. Dans ce sens, on identifie une causalité unidirectionnelle de long-terme allant du revenu aux émissions de CO<sub>2</sub>, part tête (tel est aussi le cas pour les émissions de SO<sub>2</sub> et

de NOx). Cela signifie que tout accroissement du PIB entraînant une augmentation des émissions polluantes, dans la mesure où l'adoption de politiques et de stratégies de réduction de la concentration des émissions et le recours aux investissements à faible intensité polluante, ne va pas nuire à la croissance économique en Tunisie. Dans ce cadre, la mise en application d'une panoplie de mesures visant la protection de la qualité de l'environnement tunisien et la maîtrise de la consommation énergétique devront être les priorités primordiales dans le contexte du développement durable et du renforcement de la croissance de long-terme en Tunisie.

### Références bibliographiques et notes

1. A Elif, T A Serap, G I Tunc. The relationship between income and environment in Turkey: Is there an environmental Kuznets curve? . *Energy Policy*, **2009**, 37, 861–867.
2. A K Richmond, R K Kaufmann. Is there a turning point in the relationship between income and energy use and/or carbon emissions. *Ecological Economics*, **2006**, 56 (2), 176–189.
3. A Kukla Gryz. Economic growth, international trade and air pollution: a decomposition analysis. *Ecological economics*, **2008**, 6-8, 1329–133,
4. Agence Nationale de Maitrise de l'Énergie et Agence d'Efficacité Énergétique. Projets Sages ; Plans d'actions d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre par la maîtrise de l'énergie en Tunisie. Agence canadienne de développement international, **2004**.
5. C Hurlin. Cours d'économétrie appliquée: Séries temporelles.
6. C Tavéra. Le Modèle VAR stationnaire standard, Université de Rennes1.
7. D E Giles, C Mosk. Ruminant eructation and a long-run environmental Kuznets curve for enteric methane in New Zealand: Conventional and fuzzy regression. *Econometrics Working Paper*, **2003**, 306.
8. D Holtz-Eakin, T M Selden. Stoking the fires? CO2 emissions and economic growth. *Journal of Public Economics*, **1995**, 57, 85–101.
9. D I Stern, M S Common, E B Barbier. Economic growth and environmental degradation: the environment Kuznets Curve and sustainable development .*World development*, **1996**,. 24, 7, 161-175.
10. D Soumyananda. Does Environment link to growth? Economic Research Unit. Indian Statistical Institute, **2005**, Kolkata-108.
11. D Soumyananda. Environmental Kuznets curve hypothesis: a survey. *Ecological Economics*, **2004**, 49 (4), 431–455.
12. F Perroux. L'économie du XX<sup>e</sup> siècle. Grenoble, Presses Universitaires de Grenoble, **1991**, p.191, 763,
13. Fiche de synthèse. Situation économique et financière de la Tunisie. UBIFRANCE et les Missions Économiques, **2009**, MINEIE-DGTPE, AFAQ ISO 9001.
14. G M Grossman, A B Krueger. Economic growth and the environment. *Quarterly Journal of Economics*, **1995**, 110, 353-377.
15. H E Chebbi. Long and short-run linkages between economic growth, energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions in Tunisia. Working Paper, **2009**, 485.
16. H Egli. The environmental Kuznets curve-evidence from time series data for Germany. Working Paper Series. Institute of Economic Research, **2004**, 04–33.
17. H Hettige, M Mani, D Wheeler. Industrial pollution in economic development: Kuznets revisited. *World Bank Discussion Papers*, **1999**, 402.
18. J A List, C A Gallet. The environmental Kuznets curve: does one size fit all? *Ecological Economics* 31. **1999**, 409–423.
19. J B Ang. CO<sub>2</sub> emissions, energy consumption, and output in France. *Energy Policy*. **2007**, 35 (10), 4772–4778.
20. J M Dean. Does trade liberalization harm the environment? A new test. *Canadian Journal of Economics*, **2002**, 35, 819–842
21. K Simon. Economic growth and income inequality. *American Economic Review*. **1995**, 45,1-28,
22. M Cole. R Eliott. Determining the trade–environment composition effect: the role of capital, labor and environmental regulations. *Journal of Environmental Economics and Management*, **2003**, 46 (3), 363–383.
23. M Fodha, O Zaghdoud. Economic growth and pollutant emissions in Tunisia: An empirical analysis of the environmental Kuznets curve. *Energy Policy*. **2010**, 38, issue 2.
24. M Galeotti. Economic growth and the quality of the environment: taking stock. Fondazione Eni Enrico Mattei Working Paper. **2003**, 89.
25. M Lindmark. An EKC-pattern in historical perspective: carbon dioxide emissions, technology, fuel prices and growth in Sweden, 1870–1997. **2002**, 42, 333–347.
26. M Torras, J K Boyce. Income, inequality and pollution: a reassessment of the environmental Kuznets curve. *Ecological Economics*, **1998**, 25, 147–160.

27. N Khannaa, F Plassmann, The demand for environmental quality and the environmental Kuznets Curve hypothesis. *Ecological Economics*, **2004**, 51 (3-4), 225–236.
28. O Blanchard, D Cavard, P Crigui. Négociation internationale sur le climat, conserver les normes du régime Rio-Kyoto. Communication présentée au LIVe Congrès annuel de l'AFSE, Paris, **2005**.
29. P Berthaud, D Cavard, P Criqui. Le régime international pour le climat, vers la consolidation ou l'effondrement. *Revue française d'économie*, **2004**, XIX (2), pp. 163-85.
30. P Theodore. Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development. **1993**, WEP 2-22/WP. 238.
31. Protocole de Kyoto à la Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, Nations-Unies, **1998**.
32. R Ben Hmida R, S Hammami, M L Constantinescu. Développement économique et dégradation de l'environnement en Tunisie. **2009**.
33. R. J Culas. Deforestation and the environmental Kuznets curve: an institutional perspective. *Ecological Economics*, **2007**, 61 (2-3), 429–437.
34. S Johansen. Likelihood-Based Inference in Cointegrated Vector Autoregressive Models. Oxford University Press, Oxford, **1995**.
35. S Lardic, V Mignon. Économétrie des séries temporelles macroéconomiques et financières. First ed. Economica, Paris, **2002**.
36. S M Bruyn, J Van den Bergh, J B Opshoor. Economic growth and emissions: reconsidering the empirical basis of environmental Kuznets curves. *Ecological Economics*, **1998**, 25, 161-175.
37. T M Selden, D Song. Environmental quality and development: is there a Kuznets curve for air pollution? *Journal of Environmental Economics and Environmental Management*, **1994**, 27, 147–162.
38. T Panayotou. Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development. Working Paper, **1993**, 38.
39. T Panayotou. Economic growth and the environment. CID Working Paper, **2000**, 56.
40. T Panayotou. Economic Growth and the Environment. *Economic Survey of Europe*, **2003**, No 2, Chapitre 2, page 46.
41. T Verbeke, M De Clercq. The income-environment relationship: evidence from a binary response model. *Ecological Economics*, **2006**, 59 (4), 419–428.
42. V Brajer RW Mead, F Xiao. Health benefits of tunneling through the chinese environmental Kuznets curve. *Ecological Economics*, **2007**, 66 (4), 674–686.
43. V Suri, D Chapman. Economic growth, trade and energy: implications for the environmental Kuznets curve. *Ecological Economics*, **1998**, 25 (2), 195–208.
44. W Beckerman. Economic growth and the environment: whose growth? Whose environmental? *World Development*, **1992**, 20, 481-496.