

# **EFFET DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE FOSSILE SUR LA CROISSANCE ÉCONOMIQUE ET SUR L'ENVIRONNEMENT EN AFRIQUE SUBSAHARIENNE : UNE ANALYSE DE LA CAUSALITÉ EN DONNÉES DE PANEL SUR 14 PAYS**

Henri Aurélien ATEBA BOYOMO\*

Jean TCHITCHOUA\*\*

Received: 31/10/2019/ Accepted: 04/07/2021 / Published: 18/06/2022

Corresponding authors: jtchitchoua@yahoo.com

## **RÉSUMÉ**

L'objectif de cet article est d'analyser les effets de la consommation d'énergie fossile sur la croissance économique et sur l'environnement dans 14 pays de l'Afrique Subsaharienne<sup>1</sup>, de 1970 à 2015. A partir d'un modèle vectoriel à correction d'erreur (VECM), les résultats montrent qu'il existe une relation de causalité en panel au sens de Granger, allant de la consommation d'énergie vers la croissance, et une autre allant de la consommation d'énergie vers les émissions de CO<sub>2</sub>. Nous recommandons aux décideurs de mettre sur pied des politiques d'industrialisation et de protection de l'environnement.

## **MOTS CLÉS**

Consommation d'énergie, croissance économique, environnement, Granger causalité, Modèle VECM.

**JEL Classification :** Q40, Q51, Q56, C23

---

\* Chercheur au CEREG, Assistant à la FSEG, Université de Yaoundé II Soa (Cameroun), email : henriatebaboy@yahoo.fr)

\*\* Maître de Conférences à la FSEG, Chercheur au LAREM, Université de Yaoundé II Soa (Cameroun), email : jtchitchoua@yahoo.com

<sup>1</sup> Voir méthodologie

## EFFECT OF FOSSIL FUEL CONSUMPTION ON ECONOMIC GROWTH AND THE ENVIRONMENT IN SUB-SAHARAN AFRICA: A PANEL DATA CAUSALITY ANALYSIS OF 14 COUNTRIES".

### ABSTRACT

The objective of this article is to analyze the effects of fossil energy consumption on economic growth and on the environment for 14 countries in sub-Saharan Africa, with data ranging from 1970 to 2015. From an error-correction vector model (VECM), the results show that there is a panel-wise causal relationship in the Granger sense, ranging from energy consumption to growth, and another ranging from consumption of energy towards CO2 emissions. We recommend that decision-makers establish industrialization and environmental protection policies.

### KEY WORDS

Energy consumption, economic growth, environment, granger causality, VECM model.

JEL CLASSIFICATION : Q40, Q51, Q56, C23

تأثير استهلاك الوقود الأحفوري على النمو الاقتصادي والبيئة في إفريقيا جنوب الصحراء: تحليل السببية في بيانات لوحة من 14 دولة .

ملخص

تهدف هذه المقالة إلى تحليل آثار استهلاك الطاقة الأحفورية على النمو الاقتصادي والبيئة في 14 دولة في أفريقيا جنوب الصحراء الكبرى من 1970 إلى 2015. من نموذج متجه مع تصحيح (VECM)، تشير النتائج إلى وجود علاقة سببية لوحة Granger، تتراوح بين استهلاك الطاقة إلى النمو، وآخر تتراوح بين استهلاك الطاقة إلى انبعاثات

الطاقة CO2

نوصي صناعات القرار بوضع سياسات التصنيع وحماية البيئة.

كلمات مفتاحية

استهلاك الطاقة، النمو الاقتصادي، البيئة، السببية جراجر، نموذج VECM

تصنيف جال: C23, Q56, Q51, Q40

## INTRODUCTION

A l'instar du capital et du travail, l'énergie constitue un facteur de production et a une place majeure dans les aspects économiques, sociaux, politiques et environnementaux (AIE, 2014). En outre, il existe une forte corrélation entre la consommation d'énergie et le niveau de développement ; par exemple, la Chine détient 19.1% de consommation mondiale, 39.1% dans les pays de l'OCDE, 12.7% en Asie hors chine (AIE, 2014). L'impact de l'énergie dans le processus de croissance trouve aussi sa place dans la littérature économique. En effet, depuis les théories traditionnelles, classiques ou néoclassiques (Adam Smith, 1776, J.B Say, 1800-1819) jusqu'aux théories contemporaines (Babusiaux (2001), Darby (1981) et Hamilton (1983), (Ferguson et *al*, 2000)), l'énergie a une place de choix dans le processus productif de l'économie. Sa considération comme input remonte dans les années soixante dans le modèle KLEM proposé par Berndt et Wood (1979), et Gregory et Griffin (1976). Associées aux fonctions de types « putty-putty », « putty-clay » et « clay-clay », ce modèle suppose que la productivité  $Y$  serait encore importante si à côté du facteur capital  $K$ , du travail  $L$  et de la matière  $M$ , on y ajoute l'énergie  $E$  en tant qu'input à part entière.

S'il est reconnu que l'énergie a une influence sur la croissance économique, il n'en demeure pas moins que son influence sur l'environnement n'est pas à négliger. En effet selon l'AIE (2014), la production mondiale d'énergie destinée à la consommation émane des énergies fossiles, et constituait en 2004 11,2 Gtep, avec 3.95 Gtep pour la production mondiale de pétrole, le Charbon avec 2.8 Gtep, le

Gaz naturel 2.4 Gtep, 0.7 Gtep pour le nucléaire, contre 1.2 Gtep en moyenne seulement pour la biomasse et les énergies renouvelables. Par cette analyse, il apparait que l'énergie produite et destinée à la consommation en vue de la création de la richesse émane des ressources fossiles, ou non renouvelables, qualifiées de polluantes.

Forster (1973), Luptacik & Shubert (1982), Van Der Ploeg & Withagen (1991), affirment d'ailleurs qu'on ne saurait parler de consommation d'énergie et de croissance économique, sans intégrer l'environnement.

Les premières mentions de l'environnement dans l'analyse économique émanent du rapport Meadow en 1972, des travaux de Georgescu-Roegen (1979), Hall et al. (1986), Gever et al. (1986), Kaufmann (1987), et Costanza (1980), pour qui on ne peut dissocier l'économie de l'environnement. L'introduction des questions environnementales dans l'analyse de la croissance a donné naissance à deux thèses portant sur la possibilité d'une croissance durable<sup>2</sup>.-Celle de la soutenabilité faible ou thèse des optimistes de la croissance durable ((Vivien (2005)), Hartwick (1977), (Faucheux et O'Connor, 2003)), et celle de la soutenabilité forte ou des pessimistes de la croissance durable (Vivien (2010)). Par ailleurs, certains auteurs ont introduit l'existence d'un lien entre la consommation d'énergie fossile, la croissance et l'environnement. Ils ont procédé à l'analyse de la relation entre la croissance et la pollution. Au niveau statique, il s'agit des travaux de Grossman et Kruger (1994) à travers la courbe de Kuznets environnementale (CKE) testée par Auci et Becchetti (2006), Gianni, Bellla, Carla, Massidda & Ivan Etzo (2010), Dinda (2004) Holtz-Eakin & Selden (1992) et He (2008), puis critiquée par Arrow et al. (1995), Lieb (2003), et Van Ewijk & Van Wijnbergen (1995). Sur le plan dynamique les travaux de Taylor et Brock (2004) portent sur la convergence en émission de CO<sub>2</sub> basés sur la convergence du modèle de Solow (1956) et testée par Stegman (2005), Westerlund (2008) de Strazicich & List (2003).

---

<sup>2</sup> Croissance axée sur la création des richesses d'une part, et sur la protection de l'environnement d'autre part (N.El Moujaddidi, K.Khaddou, 2010).

D'autres travaux empiriques controversés, sur l'analyse de la relation entre la consommation d'énergie, la croissance économique et l'environnement ont été développés en termes de causalité sur des modèles VECM<sup>3</sup> ou VAR<sup>4</sup>, et ont montré soit une relation de causalité, ou une absence de causalité entre ces grandeurs : Alam et al. (2011), Wang et al. (2011), Apergis & Payne (2010), Al-Mulali (2011) et Izyan et al. (2013)).

Cependant, si la littérature empirique reconnaît l'impact de la consommation en énergie fossile sur la croissance économique et sur l'environnement dans le cas des pays industrialisés, cette relation relève d'un paradoxe dans le cas des pays Africains. En effet, l'Afrique est la partie du monde qui détient le plus grand potentiel en terme de ressources énergétiques à l'instar de L'Afrique du Sud avec 90% des réserves africaines de charbon, du Nigeria (36 milliards de barils de pétrole), de l'Angola (9 milliards de barils), et du Soudan (6,4 milliards de barils), mais dont le niveau de consommation mondiale d'énergie est estimé à 6% seulement (AIE, 2014). De même, elle est la partie du globe qui émet le moins de CO<sub>2</sub> avec 2 à 3% d'émissions de polluants, contre 60% à 70% pour les sept pays que sont la Chine, les USA, l'Inde, la Russie, l'Allemagne, le Japon et l'Angleterre (Tombez et al, 2017).

La découverte de nouveaux gisements énergétiques et la construction des infrastructures énergétiques en Afrique nous renseignent que plusieurs pays<sup>5</sup> ont commencé, depuis deux ou trois décennies, à axer leur développement sur la production et la consommation des énergies fossiles. De plus, une étude franco-ivoirienne affirme que d'ici 2030 à 2050, l'Afrique produira entre 20 à 55% d'émission mondiale de CO<sub>2</sub>. Plus loin, les conséquences du changement climatique commencent à se faire ressentir en Afrique à travers la baisse de la pluviométrie (de 1114 mm pluie/ans entre 1950-1959 à 850 mm pluie/ans entre 2000-2009), et l'assèchement du bassin

---

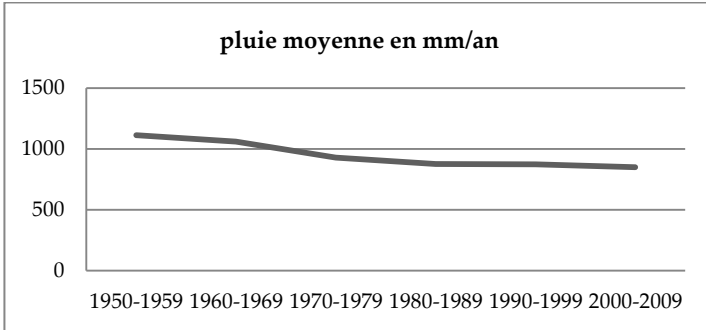
<sup>3</sup> Modèle vectoriel à correction d'erreur

<sup>4</sup> Modèle vectoriel autorégressif

<sup>5</sup> Afrique du Sud, Nigéria, Angola etc....

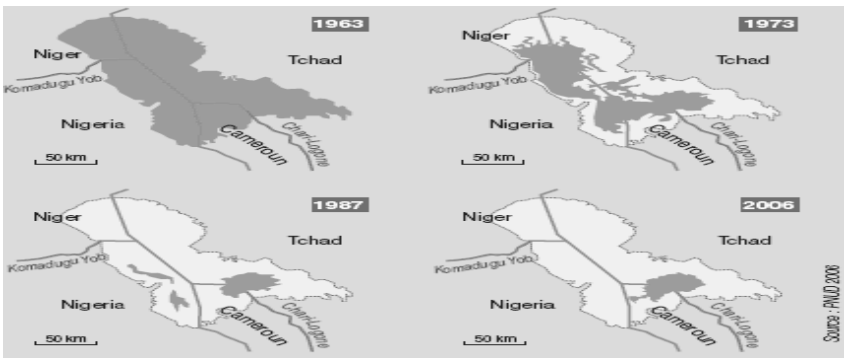
du lac Tchad (25.000 km<sup>2</sup> en 1960 à 2500 km<sup>2</sup> en 2006) tel que le montrent les graphiques suivants :

**Figure 1 :** évolution de la pluviométrie dans le Bassin du lac Tchad par mm/an



Source : auteurs à partir des données de la Drem Tchad, et Cambridge Research Unit (CRU, Royaume-Uni, 2009)

**Figure 2.** Evolution du bassin de Lac Tchad de 1963 à 2006



Source PNUD

Ces deux graphiques nous montrent que, la question de croissance axée sur la consommation d'énergie et ses effets potentiels sur l'environnement, ne relève plus seulement des pays à fort niveau de pollution, mais doit aussi être le fait des pays qui aspirent au développement. Toutefois, l'Afrique qui constitue un pollueur mineur, regorge d'énormes ressources énergétiques dont l'exploitation pourrait lui permettre de se développer, mais en respectant les accords et

sommets<sup>6</sup> sur le climat, notamment la réduction des émissions de CO<sub>2</sub><sup>7</sup> en vue de la protection de l'environnement.

L'objectif de cet article est d'analyser l'influence de la consommation d'énergie sur la croissance économique et l'environnement pour un panel de 14 pays en Afrique Subsaharienne. Pour cela, nous allons évaluer l'influence actuelle du potentiel énergétique sur la croissance économique de ces pays, et analyser l'influence de cette consommation d'énergie sur l'environnement. La question de recherche est de savoir, quel est l'effet de la consommation d'énergie fossile sur la croissance économique, et sur l'environnement en Afrique Subsaharienne ? Plus spécifiquement, nous voulons savoir d'une part, quel est l'effet de la consommation d'énergie fossile sur la croissance économique en Afrique Subsaharienne, et d'autre part, quel est l'effet de la consommation d'énergie fossile sur l'environnement en Afrique Subsaharienne.

Pour traiter cette problématique, l'article présente : la revue de littérature, la méthodologie, les résultats empiriques et les suggestions.

## **1- REVUE DE LA LITTÉRATURE**

Nous ferons d'abord une revue des théories et ensuite une revue des travaux empiriques.

### **1.1- Revue des théories sur la question**

Nous partirons des théories économiques traditionnelles, vers les théories contemporaines ayant présenté le rôle de l'énergie dans le processus productif, jusqu'à l'introduction de l'énergie dans la fonction de production KLEM, en passant par les analyses qui ont introduit l'environnement dans la relation énergie-croissance.

1.1.1. Influence de l'énergie dans le système productif : apport de la théorie économique traditionnelle et de la fonction de production KLEM.

---

<sup>6</sup> Le protocole de Kyoto signé en 1997, la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), le sommet de Rio de Janeiro de 1992 et les accords de Paris (2015)

<sup>7</sup> A 1.5 °C en 2100

Pour les classiques comme Adam Smith, si l'essence du prix des biens se trouve dans le facteur travail, il convient d'y incorporer le profit (revenu du capital) et la rente (revenu de la terre). Cependant, l'utilisation des machines génère des gains de productivité assez significatifs que l'on ne peut plus passer sous silence. Le facteur énergétique posait problème par rapport aux modèles théoriques existants. Les théoriciens de l'époque étaient embarrassés, suite à l'émergence de ce qui ne pouvait être considéré comme un facteur de production à part entière. Pour résoudre ce problème, Smith suppose que les gains de productivité (dus à l'utilisation des machines) se diluent dans les rémunérations des inputs classiques, c'est-à-dire dans les salaires et les profits. Le progrès technique posait la nécessité de proposer une analyse plus pertinente de la question énergétique. J-B. Say relève explicitement les gains de productivité tirés de l'utilisation des machines et tente d'en connaître la nature. Mais ses laborieuses explications, qui visent à réintroduire l'énergie dans les facteurs de production connus, ne sont guère convaincantes. Ricardo essaya également d'analyser l'aspect énergétique en ajoutant un nouveau chapitre sur l'existence des machines, dans la troisième édition de son livre sur les « Principes de l'économie politique et de l'impôt ». Pour les néoclassiques, l'énergie n'a vraiment pas de rôle dans le processus de production, car le schéma classique de production se limite à la combinaison exclusive des facteurs, travail, capital et terre. On y retrouve Solow, Barro et Romer. Toutefois, les véritables travaux portant sur la place de l'énergie dans le système productif sont mentionnés dès les années 1960 dans la fonction de production KLEM.

La fonction de production notée  $Y$  comprend le capital  $K$ , le travail  $L$ , la machine  $M$ , et associe l'énergie  $E$  comme un facteur de production à part entière. Ainsi, trois principaux types de fonctions comprenant ces différents facteurs peuvent être présentés : Les fonctions<sup>8</sup> « putty putty », les fonctions « Clay-Clay », et les fonctions « putty-clay ».

### 1.1.2. Prise en compte de l'environnement dans la relation énergie et

---

<sup>8</sup> Notes explicatives sur la structure de ces fonctions en annexe 1, 2 et 3.



croissance économique.

C'est le rapport Meadow de 1972, ainsi que les chocs pétroliers de 1973 et de 1979, qui sonnent l'alarme de l'impact que l'utilisation des ressources énergétiques épuisables a sur la croissance économique et l'environnement. En effet, en dehors de l'aspect économique, l'aspect environnemental avait été négligé dans le processus d'industrialisation des pays. C'est donc le sommet de Rio (1992) qui a jeté l'opprobre, et a abouti à la conclusion que, les différentes économies qui souhaitent se développer, ne doivent plus uniquement s'accrocher sur l'aspect économique, mais doivent avoir un regard plus important sur la protection de la nature.

Grâce au principe d'entropie (thermodynamique) Georgescu-Roegen (1979) montrait que le processus économique n'est pas indépendant de l'environnement, puisque sa mise sur pied modifie progressivement l'environnement, sans que celui-ci à son tour ne la modifie. Pour certains modèles de l'économie-biophysique, l'énergie, en tant qu'unique input de production, a un stock qui se modifie et se dégrade au cours du processus économique ; on parle donc de stock énergétique dégradable qui est exogène. Pour certains économistes écologiques, Hall et al. (1986), Gever et al. (1986), Kaufmann (1987), et Costanza (1980), l'énergie subit donc la loi de rendements décroissant, puisque plus les facteurs intermédiaires, à l'instar du carburant, diminuent plus la qualité et la quantité des réservoirs diminue. Le présumé impact de l'utilisation des ressources fossiles énergétiques, fait donc ressortir la question de la qualité de la croissance économique, qui se veut de plus en plus verte ou durable.

Ces analyses sur l'existence d'une croissance verte ou durable a donc fait ressortir deux thèses qui s'opposent : celle des optimistes et celle des pessimistes.

La thèse des optimistes est basée sur le principe de soutenabilité faible, qui suppose que le capital naturel est intégré dans un modèle de croissance économique à la « Solow ». Selon cette thèse, deux hypothèses sont à respecter : la substituabilité des facteurs, et l'introduction d'une technologie ou d'un progrès technique de secours en vue de relancer le processus de croissance, Daly (1994), Hartwick

(1977) et Faucheux et O'Connor, (2003). Par ce principe, il y'a donc possibilité d'une croissance durable.

La thèse des pessimistes à contrario, renvoie à un courant des économistes écologiques qui ne renient pas l'existence d'une croissance économique, mais rejettent son caractère soutenable ou durable, puisque si les ressources naturelles sont utilisées, alors celles-ci vont décroître et s'épuiser avec le temps, car l'économie ne peut pas dépasser les limites de l'écosystème.

Dans ce contexte, l'état stationnaire des ressources disponibles est inévitable. Ainsi, la diminution et l'annulation du capital naturel est donc le principal facteur qui limite le développement économique et le bien-être social.

## **1.2- Revue des travaux empiriques sur la relation consommation d'énergie fossile, croissance et environnement.**

On aura les résultats des travaux empiriques qui ont analysé la relation existante entre la consommation d'énergie, la croissance et l'environnement.

### **1.2.1. Quelques travaux portant sur la courbe de Kuznets Environnementale (CKE) et l'équation de convergence.**

Le lien entre la croissance et l'environnement a été développé d'un point de vue statique par Grossman et Krueger (1991), et d'un point de vue dynamique par le modèle de convergence en émission de CO<sub>2</sub> développés par Taylor et Brock (2004). Dans le modèle de la CKE (courbe de Kuznets environnementale), les économies, surtout celles en développement, ont une trajectoire en termes d'émission de CO<sub>2</sub> et du PIB en forme de « U » inversé. En effet, à un moment donné, les économies dont le PIB augmente, voient aussi une augmentation de la dégradation de l'environnement (Grossman et Krueger, 1991) ; et arrivé au point de retournement, les individus de cette économie dans la recherche d'un environnement sain, vont baisser leur niveau d'émission de CO<sub>2</sub>. Des travaux empiriques basés sur le modèle proposé par Grossman et Krueger (1991) ont donc été présentés dans le but de vérifier l'existence de la CKE, notamment les travaux de Auty, (1985),

Shafik and Bandyopadhyay (1992) Selden & Song (1994) List & Gallet (1999) Cole (2000b), Hill & Magnani (2000), Millimet et al. (2000), Dijkgraaf & Vollebergh (1998), Selden & Song (1994), et Cole et al. (1997)), qui à partir de diverses techniques économétriques ont validé l'hypothèse de la CKE. Toutefois, Hill & Magnani (2002) ont montré que l'EKC est satisfaite pour un panel de 156 pays ; cependant, lorsqu'ils font des estimations par groupe de pays à savoir, à revenu élevé, intermédiaire et faible, l'EKC n'est pas satisfaite.

Par contre l'analyse dynamique de la relation croissance économique et environnement a été faite par Taylor et Brock (2004) à partir du modèle de convergence de Solow (1956). Ils montrent qu'il peut exister un phénomène de rattrapage en émissions de CO<sub>2</sub> des pays les moins pollueurs vers ceux qui polluent le plus. Quelques travaux empiriques ont été obtenus, et confirment l'existence d'une relation de convergence en émissions de CO<sub>2</sub> (Stegman (2005), Westerlund (2008) de Strazicich & List (2003)).

#### 1.2.2. Quelques travaux empiriques controversés sur la nature de la relation consommation d'énergie, croissance et environnement.

En analysant la causalité au sens de Granger pour Singapour, la Malaisie et l'Indonésie (Asie du Sud-Est, ASEAN) sur une période allant de 1975 à 2011, Izyan et al. (2013) montrent l'existence de deux relations de causalité unidirectionnelle au sens de Granger, allant respectivement des émissions de CO<sub>2</sub> vers la consommation d'énergie, et de la consommation d'énergie vers la croissance économique. De même, la croissance économique cause les émissions de CO<sub>2</sub> au sens de Granger, tandis que c'est l'énergie qui cause la croissance pour l'Indonésie. De plus, il n'y a pas de relation de causalité au sens de Granger entre ces trois variables pour Singapour. Enfin, à partir d'un test de stationnarité et de cointégration en panel, ils ont établi que pour toute cette zone d'Asie du Sud-Est (ASEAN), il existe un impact positif significatif de la consommation en énergie sur les émissions de CO<sub>2</sub> dans le long terme, et que la relation entre la croissance et les émissions de CO<sub>2</sub> ont une forme quadratique.

Sur la période 1971-2006, Alam et al (2011), ont étudié la relation de causalité existante entre la consommation d'énergie, le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et le revenu pour l'Inde. Ils arrivent à la conclusion qu'il existe une relation de causalité bidirectionnelle d'équilibre entre la consommation d'énergie et le CO<sub>2</sub>. En revanche, ils notent une absence de causalité d'une part, entre le revenu et la consommation d'énergie, et d'autre part entre le revenu et les émissions de CO<sub>2</sub>. Pour Wang et al (2011), dans le cas de 28 provinces chinoises de 1995 à 2007, il existe une relation de causalité entre la consommation d'énergie, les émissions de CO<sub>2</sub> et la croissance économique. A partir d'un modèle VECM, ils montrent d'une part, que la relation entre la croissance et l'énergie et d'autre part, celle entre le CO<sub>2</sub> et l'énergie sont à court terme bidirectionnelles. Mais à long terme, si l'énergie est influencée par la croissance et les émissions de CO<sub>2</sub>, c'est l'énergie et la croissance qui à leur tour influencent les émissions de CO<sub>2</sub>. Sur une étude allant de 1980 à 2009 et menée dans les pays du Moyen Orient et de l'Afrique du Nord (MENA), Al-Mulali (2011) démontre l'existence d'une relation de long terme entre les émissions de CO<sub>2</sub>, la consommation de pétrole et la croissance. Ils relèvent l'existence d'une relation de causalité de court terme entre la consommation de pétrole et la croissance économique.

Enfin, sur une période allant de 1992 à 2004, Apergis et Payne (2010), dans le cas de 11 pays du Commonwealth, montrent qu'à court terme, il existe une relation de causalité bidirectionnelle entre la consommation d'énergie et le PIB réel, et deux relations unidirectionnelles allant du PIB vers les émissions de CO<sub>2</sub> d'une part, et de la consommation en énergie vers les émissions de CO<sub>2</sub> d'autres part. Ils montrent aussi qu'il existe une relation bidirectionnelle de long terme entre l'énergie et le CO<sub>2</sub>.

## **2- MÉTHODOLOGIE**

Nous allons présenter les données, les variables, le modèle ainsi que les techniques économétriques.

## 2.1- Présentation des données, des variables et du modèle à estimer

### 2.1.1. Présentation des données.

Les données que nous utilisons sont issues des données de la Banque mondiale WDI 2017 (world development indicator) lors de ces différentes enquêtes.

L'analyse porte sur l'influence de la consommation d'énergie par tête sur la croissance économique (PIB par tête), et sur l'environnement (émissions de CO<sub>2</sub> par tête) pour 14 pays de l'Afrique subsaharienne, à savoir : l'Afrique du Sud, le Cameroun, la république du Congo, la Cote d'Ivoire, l'Ethiopie, le Gabon, le Mozambique, le Nigeria, le Sénégal, le Soudan, la Tanzanie, le Togo, la Zambie et le Zimbabwe, sur des données allant de 1970 à 2015.

Il est utile de noter que l'Afrique subsaharienne compte 48 pays, mais en raison du manque de données, lié principalement aux guerres et conflits dans certaines régions, nous n'avons pu avoir des données complètes que sur 14 pays qui constitueront notre cadre d'analyse.

### 2.1.2-Présentation des variables et du modèle à estimer.

Dans le cadre de l'analyse de l'effet de la consommation d'énergie sur la croissance et sur l'environnement, nous aurons la variable «  $ce_{it}$  » comme la consommation d'énergie par tête en kilotonne équivalent pétrole (Ktep) du pays  $i$  dans le temps, «  $Pib_{it}$  » le PIB constant en dollar US par tête pour le pays  $i$  dans le temps, et «  $Eco_{it}$  » les émissions de CO<sub>2</sub> par tête en tonne équivalent métrique du pays  $i$  dans le temps, comme chez Izyan et al. (2013), Alam et al (2011) et Wang et al (2011).

Sans avoir effectué les tests de stationnarité et de cointégration en panel, il est difficile de proposer un modèle économétrique adéquat. Toutefois, l'analyse de l'effet de la consommation d'énergie fossile sur la croissance et sur l'environnement peut se faire à base d'un modèle général de la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Pib}_{it} = \beta_{i0} + \alpha_{ip} \text{Ce}_{it} + \gamma_{ip} \text{Eco}_{2it} + \varepsilon_{it} \quad (1) \\ \text{Eco}_{2it} = \gamma_{i0} + \alpha_{ip} \text{Pib}_{it} + \beta_{ip} \text{Ce}_{it} + \varepsilon_{it} \quad (2) \\ \text{Ce}_{it} = \gamma_{i0} + \alpha_{ip} \text{Pib}_{it} + \beta_{ip} \text{Eco}_{2it} + \varepsilon_{it} \quad (3) \end{array} \right.$$

## 2.2- Analyse de la stationnarité, de la cointégration, de la relation de long terme et de la causalité au sens de Granger en panel.

### 2.2.1- Tests de stationnarité et cointégration sur données de panel

La littérature empirique reconnaît deux grandes générations de test de racine unitaire en panel. Ces tests vérifient l'hypothèse nulle de présence d'une racine unitaire et donc de non stationnarité, contre l'hypothèse alternative de stationnarité. La différence fondamentale entre ces deux générations de tests, repose sur l'hypothèse d'indépendance/dépendance inter individuelle. La première génération de tests est dominée par les travaux précurseurs de Levin, Lin et Chu (2002) (homogénéité de la racine unitaire autorégressive) et de Im, Pesaran et Shin (1997, 2002 et 2003) (introduction de l'hétérogénéité de la racine unitaire). L'objectif est de montrer qu'il est possible de faire un test de stationnarité en panel, tout en considérant qu'il ne puisse y avoir dépendance entre les individus de l'échantillon. Or, d'un point de vue théorique, il est quasiment impossible de mener une étude entre des variables macroéconomiques sans qu'il y ait indépendance, puisque celles-ci sont caractérisées par un fort niveau de corrélation. La deuxième génération des tests de racine unitaire est dominée par les travaux de Bai et Ng (2001) et Pesaran (2007), dont l'objectif est de prendre en compte la question de la dépendance individuelle.

Compte tenu de la multitude de tests de stationnarité en panel nous allons procéder au préalable à un test d'indépendance individuelle par Pesaran (2004). En présence d'une dépendance individuelle des variables, nous pourrions appliquer un test de stationnarité de deuxième génération, à l'instar de celui de Pesaran

(2007), encore appelé cross-sectionally augmented IPS (CIPS) qui tient compte de la dépendance entre les individus. Si par contre le test de Pesaran (2004) rejette la dépendance, le test de première génération de Im, Pesaran et Shin (IPS) (1997, 2002 et 2003), pourra être implémenté.

L'analyse de la cointégration sur données de panel suppose que les variables du modèle sont stationnaires avec un même ordre, et qu'une combinaison linéaire entre celles-ci correspondant à un résidu soit intégrée d'ordre inférieur. De plus, comme dans les séries temporelles, l'analyse de la cointégration en données de panel tient compte du problème de corrélation fallacieuse. De manière générale, il s'agit de tester une hypothèse nulle de non cointégration des variables du panel (cointégration pouvant être inter/intra individuelle) contre une hypothèse alternative de l'existence d'au moins une relation de cointégration. Ainsi, le test de Pédróni (1995, 1997, 1999 et 2003) résout le problème de corrélation fallacieuse, d'hétérogénéité des paramètres du modèle, mais ne tient pas compte du problème de dépendance interindividuelle qui pourrait rendre les estimations inefficaces. Pour résoudre ce problème, Westerlund (2007) propose la mise sur pied d'un test de cointégration qui intègre en outre, la question d'indépendance temporelle. Ce test utilise et calcule quatre statistiques de test de cointégration (Ga, Gt, Pa, Pt) à partir du modèle à correction d'erreur. Gt et Pt sont obtenus à partir des écarts-types des coefficients associés au terme de correction d'erreur de façon standard, et les Ga et Pa sont obtenus en utilisant l'estimateur de variance-covariance de Newey-West (1994).

### **2.3- Estimation de la relation de long terme, et analyse de la causalité au sens de Granger sur données de panel.**

S'il existe une relation de cointégration entre les variables, il est possible d'estimer une relation de long terme ou d'équilibre, avant d'avoir recours à la causalité au sens de Granger (1987). Dans le cas des panels, il convient d'utiliser une technique appropriée dans l'optique d'estimer la relation de long terme entre les variables du modèle. On peut avoir recours d'une part, à l'estimateur FM-OLS (Fully Modified Ordinary Least Square) développés par Phillips et

Hansen (1990), et d'autre part, à l'estimateur DOLS (Dynamic Ordinary Least Square) de Saikonen (1991) et Stock et Watson (1993). Dans ce contexte, pour Kao et Chiang (2000), ces deux techniques conduisent à des estimateurs distribués asymptotiquement vers une loi normale, de moyenne nulle et de variance constante. De même Phillips et Moon (1999) et Pédróni (1996) parviennent au même résultat à partir des FM-OLS. Toutefois, Pédróni reconnaît la supériorité de la méthode DOLS pour estimer la relation de long terme dans le cas des données de panel. Dumitrescu-Hurlin (2012) ont mis sur pied un test de non-causalité à effet fixe hétérogène au sens de Granger sur des données de panel. Ils ont reconnu que, dans de nombreux domaines économiques, il est hautement probable que, si un lien de causalité existe pour un pays ou un individu, il pourrait exister aussi pour d'autres pays ou individus. Dans ce contexte, la causalité peut être testée plus efficacement dans un contexte de panel avec  $(N \times T)$  observations.

Cependant, ce test présente certaines caractéristiques qui se distinguent des autres tests de causalité de panel. En effet, il donne des résultats plus efficaces que d'autres tests puisqu'il tient compte lors de l'estimation, du problème de dépendance ou indépendance interindividuelles. Dans le même temps, le test peut être utilisé si la dimension temporelle ( $T$ ) est supérieure ou inférieure à la dimension individuelle  $N$  (Dumitrescu et Hurlin, 2012). Ce test se base généralement, sur l'hypothèse nulle  $H_0$  (pas de relation de causalité entre les variables), contre une hypothèse alternative  $H_1$  (il existe une relation de causalité entre les variables pour au moins un des individus du panel). Mathématiquement, supposons deux variables  $y_{i,t}$  et  $x_{i,t}$  stationnaires observées pour  $N$  individus sur  $T$  périodes. On dit alors que  $x_{i,t}$  cause  $y_{i,t}$  au sens de Granger, si les informations passées apportées par la variable  $x_{i,t}$  sont significatives et influentes pour prédire  $y_{i,t}$ . De même,  $y_{i,t}$  cause  $x_{i,t}$  si les valeurs passées de  $y_{i,t}$  sont significatives pour influencer  $x_{i,t}$ . on peut écrire le modèle à estimer est le suivant :



$$\left\{ \begin{array}{l} y_{it} = \beta_i + \sum_{k=1}^n \varphi_{ik} y_{it-k} + \sum_{k=1}^n \rho_{ik} x_{it-k} + \varepsilon_{it} \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{it} = \alpha_i + \sum_{k=1}^n \nu_{ik} x_{it-k} + \sum_{k=1}^n \beta_{ik} y_{it-k} + \varepsilon_{it} \end{array} \right. \quad (5)$$

Ceci consiste à tester :

$$H_0: \rho_{ik} = 0 \text{ contre } H_1 \ni \rho_{ik} \neq 0 \quad \text{pour l'équation (4)}$$

(causalité de  $x_{i,t}$  vers  $y_{i,t}$ )

$$H_0: \beta_{ik} = 0 \text{ contre } H_1 \ni \beta_{ik} \neq 0 \quad \text{pour l'équation (5)}$$

(causalité de  $y_{i,t}$  vers  $x_{i,t}$ ).

### 3- RÉSULTATS EMPIRIQUES

#### 3.1- Résultats des tests de stationnarité et de cointégration en panel.

Comme énoncé à la section précédente, la mise en œuvre du test de stationnarité et de cointégration en panel, doit prendre en compte le problème de la dépendance interindividuelle. Il est donc judicieux pour nous de procéder dans un premier temps au test de dépendance entre les individus de Pesaran (2004). Basé sur une statistique abrégée CD-test pour « Cross Dépendance », le test de Pesaran (2004) teste l'hypothèse nulle d'indépendance entre les individus, contre l'hypothèse alternative de dépendance entre les individus. Les résultats du test d'indépendance rejettent pour toutes les variables (Ce, Pib et Eco<sub>2</sub>) l'hypothèse d'indépendance entre les individus du panel. En effet, les valeurs CD-test sont de 13,6 (0,000) pour la consommation d'énergie, 8,74 (0,000) pour le Pib et 2,93 (0,003) pour les émissions (confère annexe 1). De plus, la corrélation moyenne absolue entre ces variables pour les 14 pays est 0,686 pour la consommation d'énergie, 0,397 pour le Pib et 0,39 pour les émissions de CO<sub>2</sub> (confère annexe 1). En conclusion, il existe une dépendance interindividuelle dans notre échantillon.

3.1.1. Résultats des tests de stationnarité : le test de Pesaran (2007) ou test CIPS

Suite à la relation de dépendance existante entre les individus de notre échantillon, et conformément à la littérature, les tests de stationnarité en panel de deuxième génération sont recommandés. On aura donc recours à ce niveau au test de racine unitaire de Pesaran (2007) ou cross sectionally test de pesaran, renvoyant à une amélioration du test de Im, Pesaran et Shin (1997, 2002 et 2003), d'où l'abréviation CIPS.

Les résultats du test de stationnarité des variables en panel sont contenus dans le tableau ci-dessous :

**Tableau n°1 : Résultats du test de racine unitaire de Pesaran (2007)**

Variables A niveau	Constante		Constante et trend			
	Valeur calculée	p-value	Valeur calculée		p-value	
Ce	-1,26	1%	-2,44	-2,37	1%	-2,93
		5%	-2,25		5%	-2,76
		10%	-2,14		10%	-2,66
Pib	-0,727	1%	-2,44	-1,47	1%	-2,93
		5%	-2,25		5%	-2,76
		10%	-2,14		10%	-2,66
Eco2	-2,41	1%	-2,44	-2,87	1%	-2,93
		5%	-2,25		5%	-2,76
		10%	-2,14		10%	-2,66

**Tableau n°1 : (Suite)**

Variables en différence	Constante		Constante et trend			
	Valeur calculée	p-value	Valeur calculée		p-value	
DCe	-5,61	1%	-2,44	-6,02	1%	-2,93
		5%	-2,25		5%	-2,76
		10%	-2,14		10%	-2,66
DPib	-5,02	1%	-2,44	-5,41	1%	-2,93
		5%	-2,25		5%	-2,76
		10%	-2,14		10%	-2,66
DEco2	-6,14	1%	-2,44	-6,37	1%	-2,93
		5%	-2,25		5%	-2,76
		10%	-2,14		10%	-2,66

Source : auteurs sur stata 13

Les résultats du test de stationnarité indiquent que toutes les variables sont stationnaires en différence première. On conclut que les séries sont I (1) et il n'est pas possible de rejeter l'hypothèse  $H_1$  de stationnarité des séries en panel. De ce fait, il existe au moins une relation de cointégration ou de long terme entre les variables, qu'il convient de vérifier à l'aide d'un test de cointégration.

### 3.1.2. Résultats du test de cointégration de Westerlund.

Les résultats du tableau suivant indiquent que les quatre statistiques de cointégration **Gt**, **Ga**, **Pt** et **Pa** sont significatifs au seuil de 1%. On ne peut donc pas rejeter l'hypothèse alternative de cointégration entre les variables du modèle. Suivant :

**Tableau n°2** : résultats du test de cointégration de Westerlund (2007).

statistic	value	z-value	p-value
<b>Gt</b>	-3,304	-3,453	0,000***
<b>Ga</b>	-18,709	-2,591	0,005***
<b>Pt</b>	-15,520	-7,717	0,000***
<b>Pa</b>	-25,290	-8,194	0,000***

(\*\*\*) significativité au seuil de 1%.

Source : auteurs sur stata 13

### 3.2- Résultats des estimations des relations de long terme et de la causalité au sens de Granger.

Compte tenu de l'existence d'au moins une relation de cointégration entre les variables, il convient dans un premier temps d'estimer les relations de long terme d'une part, et de mener une analyse par la causalité d'autre part.

#### 3.2.1. Résultats d'estimation de la relation de long terme par l'estimateur FMOLS et DOLS.

Le tableau suivant résume les résultats d'estimation de long terme entre les variables, à partir du modèle composé des équations (1), (2) et (3) par la méthode FMOLS et DOLS.

**Tableau n°3 :** Résultats des estimations de la relation de long terme par la méthode FMOLS et DOLS.

Variable endogène (Pib)		
Variables explicatives	Méthode	
	FMOLS	DOLS
Ce	-0,27** (0,156)	-0,200** (0,3822)
Eco2	559,15*** (0,000)	517,10*** (0,000)
Variable endogène (Eco2)		
Variables explicatives	Méthode	
	FMOLS	DOLS
Ce	0,0004** (0,04)	0,0005*** (0,01)
Pib	0,00071*** (0,000)	0,0008*** (0,000)
Variable endogène (Ce)		
variables explicatives	Méthode	
	FMOLS	DOLS
Pib	-0.046390** (0,04)	--0.063100** (0,05)
Eco2	39.15081* (0,08)	46.29849* (0,09)

(\*\*\*), (\*\*), (\*) indique la significativité respectivement au seuil de 1%, 5% et 10%.

Source : auteurs sur Eviews 9.

Lorsque la variable Pib est considérée comme endogène, les résultats indiquent qu'il n'existe pas une relation de long terme entre la consommation d'énergie et cette variable car les coefficients sont non significatifs. En d'autres termes, la consommation d'énergie n'a pas à long terme une influence sur le niveau du Pib. En effet, le secteur énergétique Africain caractérisé par une sous-consommation des énergies fossiles, n'est pas assez significatif pour influencer l'industrie et donc, la croissance économique. Par contre, il existe une relation de long terme positive entre les émissions de dioxyde de carbone et le Pib. Dans cette optique, une augmentation du niveau des émissions de CO2 est caractérisée par une augmentation du niveau du Pib<sup>9</sup>.

De même, lorsque la variable émission de CO2 est considérée comme variable endogène, les estimateurs FMOLS et DOLS indiquent qu'il existe une relation de long terme positive entre les émissions de CO2 et la consommation d'énergie d'une part, montrant que l'accroissement de la consommation d'énergie fossile pourrait entraîner

<sup>9</sup> Confère critique de la CKE par Arrow et Al (1995)

un accroissement des  $Eco_2$ , et d'autre part, une relation positive entre le Pib et les  $Eco_2$ , montrant qu'un accroissement du montant Pib ou de richesse, peut entraîner un accroissement du niveau de la pollution à long terme<sup>10</sup>. Enfin, par ces mêmes méthodes à long terme, les  $Eco_2$  influencent positivement le niveau de la consommation.

Au total, les résultats nous renseignent qu'à long terme, la consommation d'énergie fossile a un effet positif significatif sur les  $Eco_2$ , tandis que cette consommation d'énergie ( $Ce$ ), n'est pas assez significative pour influencer la croissance (Pib). En effet, pour le premier résultat, on peut conclure qu'une augmentation de la consommation d'énergie fossile entraîne un accroissement de la dégradation de l'environnement pour ces pays d'Afrique subsaharienne. De plus, il est admis que le niveau de consommation d'énergie en Afrique subsaharienne n'est pas assez significatif en vue de générer la croissance économique à long terme<sup>11</sup>. Toutefois, la validation de l'hypothèse de cointégration entre les variables montre qu'il pourrait exister au moins, une relation causale entre celles-ci qu'il conviendrait de vérifier par la causalité au sens de Granger (1987), améliorée par (Dumitrescu et Hurlin, 2012).

### 3.2.2. Résultats de la causalité au sens de Granger en panel.

Nous allons estimer notre modèle vectoriel à correction d'erreur (VECM), dans le but de vérifier par le biais d'un panel, la relation de causalité existante entre nos variables stationnaires (Dumitrescu et Hurlin, 2012). Dans ce contexte, à partir des variables DPib, D $Ce$  et D $Eco_2$  stationnaires, on a le modèle :

---

<sup>10</sup> Confère théorie de la CKE par Grossman et Krueger (1994).

<sup>11</sup> En effet, il est reconnu par l'agence internationale de l'énergie que l'Afrique Subsaharienne est en sous-consommation énergétique, car elle utilise uniquement 6% de son potentiel disponible (AIE, 2014).

$$\left\{ \begin{aligned} DPib_{it} &= \sum_{p=1}^k \alpha_{ip} DPib_{it-p} + \sum_{p=1}^k \beta_{ip} DCe_{it-p} + \sum_{p=1}^k \gamma_{ip} DEco_{2it-p} + \varepsilon_{it} & (6) \\ DEco_{2it} &= \sum_{p=1}^k \lambda_{ip} DEco_{2it-p} + \sum_{p=1}^k \theta_{ip} DCe_{it-p} + \sum_{p=1}^k \rho_{ip} DPib_{it-p} + \varepsilon_{it} & (7) \\ DCe_{it} &= \sum_{p=1}^k \lambda_{ip} DCe_{it-p} + \sum_{p=1}^k \theta_{ip} DEco_{2it-p} + \sum_{p=1}^k \rho_{ip} DPib_{it-p} + \varepsilon_{it} & (8) \end{aligned} \right.$$

Avec D l'opérateur différence, i la dimension individuelle, t la dimension temporelle et p le retard de notre modèle. Pour ce qui est des retards optimaux p\* pour p allant de 1 à 5<sup>12</sup>, ils correspondent au retard pour lesquels toutes les p-value sont significatives au seuil de 1%, et dont les statistiques Z-bar et Z-bar tilde sont plus importantes (confère quelques résultats sur stata annexes 6, 7 et 5). Le tableau suivant résume les résultats de ce test :

**Tableau n°4 : Résultats du test de Granger causalité en panel par Dumitrescu-Hurlin (2012)**

Nature de la causalité Variables Ce et Pib	Lien de causalité	Retard optimal (p*)	Statistiques		p-value
Bidirectionnelle	Ce cause Pib	1	Z-bar	8.2837***	0,000
			Z-bar tilde	7.4738***	0,000
	Pib cause Ce	1	Z-bar	4.5915***	0,000
			Z-bar tilde	4.0885***	0,000
Nature de la causalité Variables Ce et Eco2	Lien de causalité	Retard optimal (p*)	Statistiques		p-value
Bidirectionnelle	Ce cause Eco2	1	Z-bar	8.568***	0,000
			Z-bar tilde	7.7345***	0,000
	Eco2 cause Ce	1	Z-bar	4.5189***	0,000
			Z-bar tilde	4.0220***	0,000
Nature de la causalité Variables Pib et Eco2	Lien de causalité	Retard optimal (p*)	Statistiques		p-value
Bidirectionnelle	Pib cause Eco2	5	Z-bar	4.2175 ***	0,000
			Z-bar tilde	3.4676 ***	0,000

<sup>12</sup> En économie, et selon la méthode Backword de Almon (1965) dans le choix du polynôme retard, le retard le plus élevé est celui d'ordre 5.

Eco <sub>2</sub> cause	4	Z-bar	9,4546***	0,000
Pib		Z-bar tilde	7,792***	0,000

Source : auteurs sur stata 13

Les résultats montrent globalement qu'il existe une causalité bidirectionnelle entre les différentes variables de notre modèle. Dans un premier temps entre la consommation d'énergie et le Pib, comme chez Apergis et Payne (2010), ensuite, dans les deux sens, entre la consommation d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> confirmant les résultats de Wang et al (2011), et enfin, entre les émissions de CO<sub>2</sub> (Eco<sub>2</sub>) et le PIB.

Toutefois, les résultats les plus importants tendent à montrer que pour notre panel, il existe une relation de causalité allant d'une part, de la consommation d'énergie vers le Pib (les Z-bar =**8.2837** et Z-bar tilde =**7.4738** sont significatif à 1%) et d'autre part, qu'une causalité allant de la consommation d'énergie vers les Eco<sub>2</sub> (les Z-bar =**8.568** et Z-bar tilde =**7.7345** sont significatif à 1%). Ces deux résultats nous permettent de comprendre que la consommation d'énergie fossile a un effet significatif, non seulement sur la croissance économique, mais aussi sur la qualité de l'environnement pour tout le panel des pays Africains. L'effet de causalité, allant de la consommation d'énergie vers le Pib, nous permet de comprendre qu'une prédiction liée à l'augmentation du niveau d'énergie fossile consommée n'est pas sans effet sur le niveau de la croissance. Dans ce contexte, les efforts entrepris en termes de développement des infrastructures énergétiques, à partir des ressources non renouvelables disponibles, peuvent être une voie qui pourra permettre aux pays d'accroître le niveau de production énergétique et de la consommation propice à l'industrialisation. S'agissant de l'influence de la consommation d'énergie fossile sur l'environnement, un accroissement de l'exploitation et de la consommation des énergies non renouvelables pourrait avoir des effets néfastes sur l'environnement.

## CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

En dépit de la carence en termes de consommation d'énergie que connaissent les pays Africains, plusieurs d'entre eux, dans le souci de

s'industrialiser, ont mis sur pied des politiques de développement du secteur énergétiques axées sur l'exploitation et la consommation des ressources fossiles disponibles. Toutefois, même si l'Afrique ne constitue pas un potentiel pollueur avec 2 à 3% de pollution mondiale (Tombez et Al, 2017), les effets du changement climatique se font déjà ressentir avec la baisse de la pluviométrie de 1114 mm pluie/an entre 1950-1959 à 850 mm pluie/an entre 2000-2009, mais aussi avec l'assèchement du bassin du lac Tchad. De plus, une étude Franco-Ivoirienne estime qu'entre 2030 et 2050, l'Afrique sera responsable de 20 à 55% de la pollution mondiale. Fort de toutes ces considérations, notre article a pour objectif d'analyser l'effet de la consommation d'énergie sur la croissance économique d'une part, et sur l'environnement d'autre part. Pour y parvenir à partir d'un panel de 14 pays de l'Afrique subsaharienne, nous nous sommes basés sur la méthode de la causalité en panel au sens de Granger développée par Dumitrescu-Hurlin (2012) à partir d'un modèle VECM.

Les résultats montrent globalement qu'il existe une relation de causalité au sens de Granger pour le panel, allant de la consommation en énergie fossile vers le Pib d'une part, et d'autre part, de la consommation d'énergie vers les émissions de CO<sub>2</sub>. Fort de ces résultats, deux suggestions en termes de politique d'industrialisation et de politique environnementale peuvent être données.

**Politique d'industrialisation axée sur la consommation des ressources disponibles.**

En effet, même si tout le panel montre globalement l'influence de la consommation en énergie fossile sur la croissance économique, individuellement, beaucoup de pays en dépit d'un énorme potentiel en termes de ressources énergétiques, enregistrent encore des taux de croissance faibles. Il est donc important pour eux d'exploiter, de transformer et de consommer leurs ressources disponibles (pétrole, Gaz et charbon etc...) en vue de s'industrialiser.



### Politique de protection de l'environnement.

Dans la recherche de l'industrialisation, les non pollueurs d'aujourd'hui peuvent constituer les pollueurs de demain (cas de la Chine dans les années 1980). De plus, les enjeux liés à la protection de l'environnement nous poussent à suggérer aux décideurs, en plus des politiques d'industrialisation, des politiques liées à la protection de l'environnement.

### Références bibliographiques

**Alam & al., (2011).** « Dynamic modeling of causal relationship between energy consumption, CO2 emissions and economic growth in India », *Renewable and Sustainable Energy Review*, vol. 15, pp. 3243-3251.

**Al-Mulali U., (2011).** « Oil consumption, CO2 emissions and economic growth in MENA Countries », *Energy*, vol. 36, pp. 6165-6171.

**Apergis N., and Payne J. E., (2010).** "Energy consumption and growth in South America: Evidence from a panel error correction model", *Energy Economics*, vol. 32, pp 1421 - 1426;

**Arrow & al., (1995).** "Economic growth, carrying capacity and the environment", *Science* 268, 520-521;

**Auci S., & Becchetti L., (2006).** « The instability of the adjusted environmental kuznets curves », *ecological economics*, 2006, vol. 60, issue 1,282-298.

**Auty R M., (1985).** "Export base theory staple flexibility and tropical regional development", *Singapore Journal of tropical geography*, Vol. 6, pp 13-22.

**Babusiaux D., (2001).** « Eléments pour l'analyse des évolutions des prix du brut », *Revue de l'Énergie*, n° 524, février.

**Bai J., & Ng S., (2004).** « A PANIC attack on unit roots and cointegration », *Econometrica*, 72, pp. 1127-1177.

**Bella G., Massidda, C., & Etzo I., 2010.** « A panel estimation of the relationship between income, electric power consumption and Co2 emissions », MPRA Paper 26077, University Library of Munich, Germany.

- Berndt E., & Wood D., (1979).** *“Engineering and Econometric Interpretations of Energy – Capital”*. Optimisation sous contrainte.
- Brock W. A., and Taylor M. S., (2010).** *“The green Solow model”*, *Journal of Economic Growth*, Vol. 15, pp 127 – 153;
- Cole M. A., (200b).** *« Trade liberalization, economic growth and the environment »*, Cheltenham, UK and Northampton, MA: Edward Elgar;
- Costanza R., (1980).** *« Embodied energy and economic valuation »*, *Science*, vol 210, p. 1219-1224.
- Daly H., (1994).** *« Operationalizing sustainable development by investing in natural capital »*, in Janson AM., Hammer M Folke C., Costanza R (Eds), *Investing in the natural capital : the ecological economics approach to sustainability*, Washington DC : Island PRESS, p 22-37
- Darby Michael R., (1981).** *« The price of oil and world inflation and recession »*.
- Dijkgraaf E., & Vollebergh H. R. J., (1998).** *“Environmental Kuznets revisited: time series versus panel estimation, the CO2 case”*, Erasmus University Rotterdam, OCFEB Research memorandum, n° 9911;
- Dumitrescu E I., and Hurlin C., (2012).** *« Testing for Granger Non-causality in Heterogeneous Panels. Economic Modelling »*, 29(4), 1450-1460.
- Faucheux S., & O’Connor M. Eds., (1998).** *« Valuation for Sustainable Development: Methods and Policy Indicators »*, Cheltenham, UK, Edward Elgar Publishers.
- Forster B., (1973).** *“Optimal Capital Accumulation in a Polluted Environment”*, *Southern Economic Journal*, Vol. 39, pp 544-547;
- Georgescu-Roegen N., (1975).** *“Energy and economic myth”*, *southern Economic Journal*, Vol. 41, pp 347-381;
- Gever J, Kaufmann R. K, Skole D, Vorosmarty C, (1986).** *« Beyond Oil: The Threat to Food and Fuel in the Coming Decade »*s, Ballinger, Cambridge, Mass.
- Granger C., & Newbold P., (1974).** *« Spurious regressions in econometrics »*, *Journal of Econometrics*, vol 2, p. 111–120.

- Griffin J.-M., and Paul R., Gregory, (1976).** « An intersectoriel translog model of energy substitution response », in *the American economics*, vol.66, p 845-857.
- Grossman G. M., and Krueger A. B., (1991).** « *Environmental impacts of the North American Free trade Agreement* », NBER working paper 3914;
- Im K.S., Pesaran M.H., & Shin Y., (1997).** « *Testing for Unit Roots in Heterogenous Panels.* », DAE, Working Paper 9526, University of Cambridge.
- Im K S., Pesaran M.H., & Shin Y., (2002).** « *Testing for Unit Roots in Heterogenous Panels.* », revised version of the DAE, Working Paper 9526, University of Cambridge.
- Im K.S., Pesaran M.H., & Shin Y., (2003).** « Testing for Unit Roots in Heterogeneous Panels. », *Journal of Econometrics*, 115, 1, 53-74.
- Hall A. S., Culterl C. J., and & Kaufmann R., (1986).** « *Energy and Resource Quality: The Ecology of the Economic Process,* » Wiley Interscience, New York.
- Harris R. D. F., and Tzavalis E., (1999).** « Inference for unit roots in dynamic panels where the time dimension is fixed ». *Journal of Econometrics* 91 : 201–226.
- Hartwick J., (1977).** “Intergenerational Equity and Investing Rents from Exhaustible Resources”, *American Economic Review*, 67(5), 972-974.
- HE J., (2007).** « *Pollution haven hypothesis and environmental impacts of foreign direct investment: The case of industrial emission of sulfur dioxide (SO2) in Chinese provinces* », *Ecological Economics*, 60, 228-245.
- Hill J. R., & Magnani E., (2000).** “*An exploration of the conceptual and empirical basis of the environmental Kuznets curve*”, School of Economics, university of New South Wales, Sydney, mimeo;
- Holtz-Eakin D., & Selden T. M., (1995).** “Stocking the fires? CO2 emissions and economic growth”, *Journal of Public Economics*, Vol. 57, pp 85-101;
- Im, K S., Pesaran M H., and Shin Y., (2003).** « Testing for unit roots in heterogeneous panels ». *Journal of Econometrics* 115: 53–74.
- Kaufmann R. K., (1987),** « Biophysical and Marxist economics: learning from each other », *Ecological Modelling*, vol 38, p. 91-105.

- Hadri K., 2000.** « Testing for stationarity in heterogeneous panel data ». *Econometrics Journal* 3: 148–161.
- Hamilton J., (2009).** « Causes and consequences of the oil shock of 2007-08 ».
- Kao C., & Chiang M.H., (2000),** “On the estimation and inference of a cointegrated regression in panel data”, *Advances in Econometrics*, 15, edited by B. Baltagi et C. Kao, pp. 179-222, Elsevier Science.
- Levin A., Lin C. F, and Chu C.-S J., 2002.** « Unit root tests in panel data: Asymptotic and finite-sample properties ». *Journal of Econometrics* 108: 1 24.
- Lieb C, (2003).** “The environmental Kuznets curve and satiation: A simple static model”, *Environment and Development Economics*, vol. 7, pp 429-448;
- List J. A., & Gallet C. A., (1999).** « The environmental Kuznets curve: does one size fit all? », *Ecological Economics*, Vol. 31, pp 409-423;
- Luptacik M., and Schubert U., (1982).** “Optimal Economic Growth and the Environment”, *Economic Theory of Natural Resources*, Wien, ysisca;
- Maddala G S., and Wu S., 1999.** « A comparative study of unit root tests with panel data and a new simple test », *Oxford Bulletin of Economics and Statistics* 61: 631–652.
- Millimet D L., & al., (2000).** « The Environmental Kuznets Curve : real progress or misspecified models », Department of Economics, Southern Methodist University, Dallas, mimeo.
- Moon, H R., & Phillips P C B., (1998).** “A reinterpretation of the Feldstein-Horioka regressions from a nonstationary panel viewpoint”, Working Paper, Yale University.
- Newey W K., and West D, (1994).** « Automatic lag selection in covariance matrix estimation ». *Review of Economic Studies* 61: 631–653.
- Pedroni P., (2004).** “Panel cointegration. Asymptotic and finite sample properties of pooled time series tests with an application to the PPP hypothesis”, *Econometric Theory*, 20(3), pp. 597-625.
- Pesaran H M., (2003).** « A Simple Panel Unit Root Test in the Presence of Cross Section Dependence », Mimeo, University of Southern California.
- Pesaran, M H, (2004).** « General Diagnostic Tests for Cross Section Dependence in Panels. » CESifo Working Paper no. 1229, CESifo Group Munich, 2004.

- Pesaran M H., (2007).** « A simple panel unit root test in the presence of cross-section dependence, » *journal of applied Ecobometrics, John Wiley and Sons, Ltd.*, vol.22(2), pages 265-312.
- Phillips P. C. B., & Hansen B.E., (1990).** “Statistical inference in instrumental variables regression with I (1) processes”, *Review of Economic Studies*, 57, pp. 99-125.
- Saikkonen P., (1991).** “Asymptotically efficient estimation of cointegrating regressions”, *Econometric Theory*, 58, pp. 1-21.
- Selden T., and Song D., (1994).** “Environmental quality and development: Is there a Kuznets Curve for air pollution emissions?”, *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 27, pp 147-162;
- Shafik N., & Bandyopadhyay S., (1992).** “Economic development and environmental quality: Time series and cross country evidence”, Background paper for the World Development report, (Washington DC: the World Bank, 1992);
- Stegman A., (2005).** « *Convergence in carbon emissions per capita* », Centre for Applied Macroeconomic Analysis Working Paper, The Australian National University (2005).
- Stock J et Watson M, (1993).** “A simple estimator of cointegrating vectors in higher order integrated systems”, *Econometrica*, 61, pp. 783-820.
- Strazicich M C., and List J (2003).** “Are CO2 emission levels converging among industrial countries”, *Environmental and Development Economics*, Vol. 24, pp 263 – 271.
- Van Ewijk C., & Van Wijnbergen S., (1995):** “Can abatement overcome the conflict between Environment and economic growth?”, *Forthcoming in De Economist*, Vol. 143.
- Vivien, F-D., (2010).** « Penser l'économie verte : croissance durable ou décroissance soutenable ? », *Cahiers Français*, 355, 10-15.
- Vivien F.-D., (2005).** « *le développement soutenable*, Paris, La Découverte, coll », Repères – Économie.
- Wang S.S., & al., (2011).** « CO2 emissions, energy consumption and economic growth in China: a panel data analysis », *Energy Policy*, vol. 39, pp 4870-4875;

**Westerlund J., (2007).** "Testing for panel cointégration with multiple structural breaks", *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, vol. 68, pp. 101–132.

## Annexe

**Annexe 1.** Caractéristiques et structures de la fonction « putty-putty ».

*Les fonctions « putty-putty »* admettent une substituabilité *ex ante* et *ex post* entre les différents facteurs. Les substitutions entre facteurs sont supposées pouvoir intervenir avant et après que les investissements soient réalisés. Le modèle de cette fonction est basé sur la fonction de type Cobb-Douglas de la forme :

$$Y = AK^\alpha L^\beta E^\lambda \quad (9)$$

Où  $Y$  représente le PIB,  $K$  le stock de capital,  $L$  la quantité de travail,  $E$  la quantité d'énergie utilisée et  $A$  un facteur de dimension caractéristique de l'économie. Les paramètres  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\lambda$  correspondent aux élasticités de la production par rapport au capital, au travail et à l'énergie.

**Annexe 2.** Caractéristiques et structures de la fonction « clay-clay ».

*Pour les fonctions « Clay-Clay »*, toute idée de substitution *ex ante* et *ex post* entre les facteurs est rejetée. Ces fonctions reconnaissent alors l'idée de complémentarité stricte entre les facteurs capitaux, travail et énergie. Mathématiquement, elle est basée sur la fonction de Leontieff qui est de la forme :  $Y = K/v = L/u = E/w$  (10)

Où  $v$ ,  $u$ ,  $w$  sont des constantes positives qui expriment respectivement le coefficient de capital, l'intensité en main d'œuvre et l'intensité énergétique du PIB.

**Annexe 3.** Caractéristiques et structures de la fonction « putty-clay ».

Les fonctions « *putty-clay* » supposent une substitution *ex ante* entre les divers facteurs de production mais réfutent toute substitution *ex post*.

La fonction CES est du type :

$$Y = \left[ aE^{-\gamma} + bK^{*-\gamma} \right]^{-1/\gamma} \quad (11)$$

Où  $Y$  représente le PIB,  $E$  le facteur énergie, et  $K^*$  le facteur capital (mais un facteur capital supposé combiné à une proportion fixe de facteur travail). Les constantes  $a$  et  $b$  sont des paramètres de distribution tels que  $a = b = 1$ , en général, et  $\gamma$  un paramètre de substitution.

**Annexe 4.** Test d'indépendance interindividuel CD-test de pesaran (2007).

variables	CD-test	p-value	corr	Abs(corr)
ce	13,60	0,000	0,211	0,686
pib	8,74	0,000	0,135	0,397
Eco2	2,93	0,000	0,045	0,319

Source : auteurs sur stata.