



Determinants of CO₂ emissions in Mali

Déterminants des émissions de CO₂ au Mali

Abdoulaye MAÏGA

Centre Universitaire de Recherches Economiques et Sociales (CURES)
Faculté des Sciences Economiques et de Gestion (FSEG)
Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako (USSGB) – Mali

Souaïbou Samba Lamine TRAORÉ

Centre Universitaire de Recherches Economiques et Sociales (CURES)
Faculté des Sciences Economiques et de Gestion (FSEG)
Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako (USSGB) – Mali

Amadou Bamba

Centre Universitaire de Recherches Economiques et Sociales (CURES)
Faculté des Sciences Economiques et de Gestion (FSEG)
Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako (USSGB) – Mali

Adama SAMAKE

Centre Universitaire de Recherches Economiques et Sociales (CURES)
Faculté des Sciences Economiques et de Gestion (FSEG)
Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako (USSGB) – Mali

Résumé : Dans un contexte mondial de plus en plus préoccupé par les aléas climatiques, comprendre les causes de la dégradation l'environnement devient crucial, notamment pour les pays en voie de développement.

Dans le cadre de ce travail de recherche, nous avons analysé les déterminants des émissions de CO₂ au Mali. Les estimations ont porté sur la période 1975- 2014. La méthodologie utilisée est basée sur le modèle à correction d'erreur. A long terme, il existe une relation de compensation entre les émissions de CO₂ et le PIB. Cette situation est conforme avec l'hypothèse de la courbe environnementale de Kuznets (CEK). Par contre, la densité de la population a un effet négatif sur les émissions de CO₂ au Mali. Cependant, les variables explicatives comme l'ouverture commerciale et l'activité industrielle ne sont pas significative au seuil de 5%, mais ont une influence significative sur les CO₂. Selon les résultats obtenus dans le cadre de cette étude, les autorités du pays doivent mettre l'accent sur les actions de renforcement des capacités des services techniques concernés par le secteur de l'environnement pour favoriser le suivi et l'évaluation de l'état de l'environnement ; sensibilisation des populations sur les causes et les enjeux de la dégradation de l'environnement.

Ainsi, les décideurs seront plus éclairés pour mettre en œuvre des politiques économiques, environnementales et sociales efficaces.

Mots-clés : Déterminants ; CO2 ; Emissions.

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.8387956>

1. Introduction

A partir des années 1990, le Mali a connu un développement économique et démographique important ancré dans un contexte de réchauffement climatique mondial. Bien que le Mali soit un pays faiblement émetteur de gaz à effet de serre, il demeure vulnérable aux effets néfastes des perturbations climatiques et subit une pression croissante sur ses ressources naturelles.

Au cours de ces deux dernières décennies, les interactions entre le développement économique et l'environnement sont devenues un thème de plus en plus important tant au niveau national qu'au niveau international. Ces interactions entre la croissance et l'environnement sont à la fois multiples, complexes et importants. A la base, le développement et l'environnement sont liés du fait que toutes les activités économiques sont fondées sur l'environnement. C'est de ce dernier que proviennent tous les intrants de base (les métaux, les minerais, le sol, les couverts (faunique et forestier) et les ressources halieutiques) ainsi que l'énergie nécessaire à leur transformation. C'est également l'environnement qui reçoit les déchets produits par l'activité économique. L'économie du Mali repose essentiellement sur le secteur agro-pastoral (qui occupe près de 80% de la population et intervient pour plus de 40 % dans le PIB et 3/4 des exportations (MEADD, 2018)). Cependant, suite à l'augmentation de l'échelle de production, elle s'accompagne d'une dégradation de l'environnement. Ce phénomène s'inscrit désormais dans les choix politiques et économiques du pays.

Cette préoccupation s'est manifestée à l'échelle internationale par l'organisation des conférences de Stockholm en 1979, celle de Rio de Janeiro en 1992, Johannesburg en 2002, Copenhague en 2009 et Durban en décembre 2011. A ce jour, nombre des pays, en particulier les pays en développement et en transition, sont confrontés à un défi majeur, à savoir, tenir compte des liens multidirectionnels entre les aspects économiques, sociaux et environnementaux du développement, afin de pouvoir, simultanément, lutter contre la pauvreté, développer leurs perspectives économiques et protéger l'environnement. En effet, l'économie du Mali est de par sa nature très vulnérable aux risques climatiques dans la mesure où elle repose essentiellement sur l'agriculture, l'élevage et la pêche.

Pour des auteurs comme Georgescu-Roegen (1971), Meadows (1972), la dégradation de l'environnement est essentiellement due à l'activité économique (production et consommation), qui entraîne l'épuisement de ressources naturelles, l'accumulation des déchets et la concentration des polluants qui dépassent la capacité de la biosphère. Par contre Beckerman (1992) montre une forte corrélation entre les revenus et les mesures de protection de l'environnement ; il démontre qu'à long terme, la croissance économique est la meilleure façon qui garantit l'amélioration de la qualité de l'environnement.

C'est pour y remédier qu'un nouveau mode de vie fut initié et adopté par tous en général et par le Mali en particulier : le développement durable. Il se propose de trouver un équilibre entre notre mode de vie (basé sur les recettes issues des extractions minières et l'agriculture) et les limites supportables de notre planète. Il vise à concilier le développement économique et social, la protection de l'environnement et la conservation des ressources naturelles. Selon le rapport (MEADD, 2018), les

dernières estimations montrent que le Mali est responsable d'environ 0,06 % des Émissions mondiales de Gaz à Effet de Serre (GES). Selon la même source, l'approvisionnement du Mali en énergie de 2007 à 2012 est passé de 3543 à 4755 ktep, soit une progression de 34,21% sur les trois ans.

Pour la même période, on constate que les émissions de gaz à effet de serre ont augmenté légèrement de 3433,662 à 4513,955 tonnes (MEADD, 2018). La combustion de la biomasse reste la principale source d'émissions des gaz à effet de serre dans le secteur de l'énergie.

Au plan sectoriel, le secteur résidentiel est le plus polluant puisqu'il est le secteur qui consomme presque entièrement la biomasse solide. Il est suivi par le secteur de transport qui utilise essentiellement l'essence et le gasoil. Le dioxyde de carbone (CO₂) est de loin le plus dominant parmi les gaz à effet de serre émis dans les domaines de la production et de la consommation de l'énergie au Mali.

Conscient de ce défi, le Mali s'est engagé depuis plus d'une dizaine d'années, avec l'appui de la coopération multilatérale et bilatérale, dans un processus d'identification et de quantification des problèmes pouvant résulter des changements climatiques, des solutions potentielles et aussi des opportunités qui peuvent en découler pouvant soutenir un développement propre et durable pour le Mali (Adaptation et Atténuation). Cette phase a aussi connu un effort important consenti en matière de renforcement des capacités nationales sur ces aspects.

Pour réduire la pauvreté, les politiques de croissance économique ont été fortement soutenues par les pays en voies de développement (PVD). La croissance économique n'est possible qu'à travers un développement des activités économiques notamment la production. Or, ces dernières sont responsables des rejets de substances polluantes appauvrissant la couche d'ozone et dégradant l'environnement.

L'économie malienne est dominée par l'agriculture de type familial, elle a enregistré un taux de croissance moyen d'environ 5,5 % entre 2001 et 2011, supérieur à la moyenne de l'UEMOA (3,9%) (MEADD, 2018). Par contre, elle a enregistré une croissance nulle en 2012 et une légère reprise de 1,7 % en 2013, le pays a renoué avec le dynamisme économique en 2014 avec un taux de croissance de 7,2 %. Pendant la même période les émissions de gaz à effet de serre ont augmenté dans le pays de 3543 à 4755 ktep soit une augmentation de 25,48 % (MEADD, 2018).

Les questions environnementales sont de plus en plus considérées dans la mise en œuvre des politiques de développement. En effet, l'élaboration de la loi n°01-020 relative aux pollutions et aux nuisances en République du Mali définit l'environnement : « comme un ensemble perçu comme une entité, dans un espace et en un temps donné, des facteurs physiques, chimiques, biologiques et sociaux susceptibles d'avoir un effet direct ou indirect, immédiat ou à terme, sur l'espèce humaine et ses activités et sur les espèces animales et végétales ».

Il remplit trois fonctions essentielles indispensables au maintien de la vie en général et des activités économiques en particulier : une fonction de réserves de ressources pour la production de biens et services, une fonction de décharges (absorption des déchets par l'air et la terre) et une fonction de services d'habitats (air et eau). Ainsi, la dégradation de l'environnement représente un frein à la croissance économique du fait de la raréfaction des ressources qu'elle engendre, diminue le bien-être social à cause de la pollution de l'eau et de l'air qu'elle provoque et constitue un obstacle à la réalisation des Objectifs du Développement Durable.

Au Mali, la dégradation de l'environnement se manifeste sous plusieurs formes parmi lesquelles : la déforestation, la désertification, les inondations. Cela résulte de la pollution (de l'air, de l'eau, du sol), les précipitations irrégulières et l'action entropique engendrant ainsi des crises alimentaires consécutives. Parmi les différents facteurs de dégradation de l'environnement, la pollution atmosphérique occupe une place importante en ce sens qu'elle participe aux changements climatiques.

Cette pollution est due à la production de gaz à effet de serre responsables du réchauffement climatique. Le dioxyde de carbone (CO₂) est considéré comme principal polluant de tous les GES (F&D, Mars 2008). Le Groupe d'expert Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) prévoit une augmentation de 1,5 °C à 6 °C pour le siècle à venir en supposant que l'augmentation des rejets de GES continue au rythme des 20 dernières années. Au-delà de certaines températures, les rendements agricoles peuvent diminuer jusqu'à 25 % sans fertilisation et de 10 à 15 % avec fertilisation pour les PVD (CLINE, 2007). Les économies de ces pays reposant sur des secteurs tributaires du climat (agriculture, élevage, sylviculture, pêche et tourisme), en plus des problèmes d'inondation et d'érosion côtière qu'entraînera la pollution atmosphérique, les PVD devront encore faire face à une baisse de leurs revenus respectifs et la perte du PIB par tête d'ici 2200 se situe entre 30 à 35 % (STERN, 2008). Concernant le Mali, l'on observe une augmentation des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) par tête dans l'atmosphère (MEADD, 2018). Selon le rapport Brundtland (1987), le développement durable permet de répondre aux besoins des générations présentes sans compromettre la capacité de satisfaire ceux des générations futures. Ce constat suscite les interrogations globales et spécifiques ci-dessous.

Interrogation globale : Quels sont les déterminants des émissions de CO₂ au Mali ?

Interrogations spécifiques :

- Quel est l'effet de la croissance économique sur les émissions de CO₂ au Mali ?
- Quelle est l'influence de l'augmentation de la population sur les émissions de CO₂ au Mali ?
- Quelle est l'influence des échanges commerciaux sur les émissions de CO₂ au Mali ?

Suite à ces interrogations, les objectifs suivants ont été fixés.

L'objectif global de cet article est d'analyser les déterminants des émissions de CO₂ au Mali

Objectifs spécifiques :

Les objectifs spécifiques assignés à cette étude sont :

- analyser l'effet de la croissance économique sur les émissions de CO₂ au Mali ;
- analyser l'influence de l'augmentation de la population sur les émissions de CO₂ au Mali ;
- analyser l'influence des échanges commerciaux sur les émissions de CO₂ au Mali.

Hypothèses :

- la croissance économique agit positivement sur l'émission de CO₂ au Mali ;
- l'augmentation de la population agit positivement sur les émissions de CO₂ ;
- les échanges commerciaux agissent positivement sur les émissions de CO₂ au Mali.

L'article présentera l'architecture suivante : après l'introduction, la deuxième section présente la revue de littérature, la troisième section est consacrée sur l'approche méthodologique et la présentation des principaux résultats.

2. Revue de littérature

Les théories relatives aux effets des émissions de substances polluantes sur l'activité se sont construites autour du concept d'externalités, de la thermodynamique et de la croissance endogène.

Selon la théorie économique, l'offre d'un bien ou service se réalise lorsque le coût marginal est égal au prix du bien ou service en situation de concurrence pure et parfaite. Pour les classiques et néoclassiques qui s'appuient sur cette théorie, le système de marché ou encore la situation de concurrence pure et parfaite permet d'atteindre de la meilleure façon, une allocation optimale des ressources disponibles entre les membres de la société, tant du point de vue de la production que de la consommation au sens de Pareto (1960) à partir d'un système de prix. En effet, pour Pareto une affectation des ressources est préférable à une autre si elle est préférée par tous les membres de la société. Il suffit qu'un individu soit lésé lors du passage d'une affectation de ressources à une autre pour que le critère de Pareto ne puisse être appliqué. Ce critère est en accord avec le premier théorème de l'économie du bien-être qui indique, qu'un marché libre et concurrentiel fournit un résultat efficace en l'absence d'externalités. Par contre, s'il y a externalités, le marché ne conduira pas nécessairement à une allocation des ressources efficaces au sens de Pareto car, la présence d'externalités se traduira par l'apparition d'inefficiences du fait que le système de prix (prix sous ou surestimé) ne fonctionne pas. L'un des cas souvent étudiés est celui de la pollution.

La production de certains biens et services génère des émissions nuisibles (pollution) pour les générations actuelles et futures sans que les producteurs et les consommateurs individuellement responsables de ces émissions ne payent pour ces coûts. Or, pour certains économistes, le coût des biens environnementaux doit être égal à la valeur sociale de la pollution, c'est-à-dire la valeur qui égalise les coûts des dommages environnementaux générés par chaque unité de pollution supplémentaire, et les coûts associés à la réduction de cette pollution, via l'adoption de technologies propres. Pour Arthur Cecil Pigou (1920), les mécanismes d'offre et de demande ne parviennent pas à eux seuls à faire correspondre les coûts privés et les coûts sociaux de la pollution, c'est-à-dire les coûts supportés individuellement par les agents et les coûts que leurs activités ou comportements génèrent pour la société dans son ensemble. Cette situation conduit à un rejet excessif de matières polluantes. Pour traiter ce cas de défaillances des marchés dû à la pollution, deux mécanismes ont été proposés en fusionnant les agents économiques en interactions : l'instauration d'une taxe sur les biens et services correspondant aux coûts environnementaux que leur consommation engendre (approche pigouvienne) ou l'instauration d'un marché de droits à polluer (approche de Coase).

En effet, Pigou (op.cit.) propose l'intervention de l'Etat afin de faire internaliser les coûts de pollution, en imposant les producteurs d'activités génératrices d'externalités négatives pour les contraindre à en produire moins et, en subventionnant les producteurs d'activités génératrices d'externalités positives pour accroître leur production. Contrairement à Pigou, Coase (1960) attire l'attention sur la possibilité de résoudre le problème des externalités en organisant des transactions directes entre les parties concernées. Pour Coase, l'Etat doit se contenter d'attribuer des droits de propriétés clairement délimités pour les ressources concernées par les externalités, ces droits devenant alors des marchandises comme les autres.

En 1979, l'économiste Georgescu-Roegen a introduit dans ses travaux sur le processus d'évolution économique, des notions tirées de la thermodynamique et de la biologie évolutionniste. Selon cet auteur, la croissance économique est responsable de la dégradation de l'environnement, de l'accumulation des déchets et de la concentration des polluants qui dépassent la capacité d'absorption de la biosphère conformément à la loi d'entropie : prélèvements sur les ressources naturelles (élément de haute entropie) et accroissement excessif de rejets de polluants (éléments de basse entropie), et qui participent à l'augmentation de l'entropie de l'environnement.

La loi d'entropie rend en effet compte du processus de dégradation de l'énergie et de la matière, et par ce mouvement, conduit le système économique sur la voie de l'irréversibilité et d'une impasse de la croissance. La seconde loi de la thermodynamique quant à elle, exprime la dégradation irréversible de l'énergie au sein d'un système isolé qui n'échange ni matière ni énergie avec son environnement. L'évolution de ce dernier se traduit par le passage d'un état initial où l'énergie libre est transformée en énergie dissipée, caractéristique de son état final.

Pour Georgescu-Roegen, la croissance économique conduit irréversiblement vers un double mouvement : la réduction des quantités de ressources terrestres et la dégradation de leur qualité. La réduction des quantités de ressources utilisées s'accompagne d'une raréfaction des ressources in situ de manière irréversible, la biosphère étant un système fermé du point de vue de la matière (absence d'échange de matières avec l'environnement) d'une part, la dégradation qualitative des ressources naturelles conduit à l'accroissement de quantités de rejets et pollutions qui affectent durablement la biosphère (perturbations des cycles biogéochimiques, réduction de la biodiversité...) d'autre part. Il ajoute que, seule l'ignorance de la loi d'entropie peut conduire à soutenir l'idée d'une croissance possible dans un environnement fini. En dehors d'une telle conception, la croissance économique constitue un mythe dont les principaux facteurs limitants sont le taux global d'épuisement des ressources et le taux de pollution qui lui est associé. Son approche thermodynamique de l'évolution économique conduit finalement à poser un postulat d'impossibilité de la croissance économique.

Enfin, les théories de la croissance endogène, fondées sur le rôle des externalités et des explications schumpetériennes viendront réaffirmer que, les ressources environnementales peuvent être considérées comme des facteurs de la croissance endogène en mettant en exergue l'innovation.

Pour Romer (1986), l'un des théoriciens de la croissance endogène, la croissance d'une nation peut être permanente. Il montre que les externalités positives sont le résultat d'une accumulation de capital physique et de la connaissance. Romer (1990), Aghion et Howitt (1992) ont développé deux modèles où l'innovation technologique et l'investissement dans la recherche et développement sont considérées comme déterminants de la croissance à long terme.

Pour Esther Finidori et al. (2013), la réponse aux enjeux liés à la raréfaction et à la dégradation des ressources naturelles et environnementales, passe par deux voies non exclusives l'une de l'autre : modifier ou réduire notre consommation de biens et services, et innover afin de développer des technologies de production plus « vertes ». Selon cet auteur et la théorie économique, cette évolution ne pourra se faire que si les ressources environnementales sont considérées comme des facteurs de production à part entière, au même titre que le capital et le travail. Pour elle, la production des biens et services, par la pollution qu'elle occasionne, dégrade ou détruit les écosystèmes : en ce sens, le processus de production « absorbe » une partie de l'environnement, qui peut être conçu comme un facteur de production. Ainsi, la prise en compte de cette « absorption » d'une partie des ressources environnementales au cours du processus de production, implique de définir une valeur pour les biens environnementaux, valeur qui doit se refléter en suite dans les prix des biens et services auxquels font face les producteurs et les consommateurs. C'est justement cette approche qui fera l'objet de la section dédiée à l'analyse économétrique.

Simon Kuznets, a mis en relation des mesures d'inégalité dans la distribution des revenus avec la croissance économique. En se basant sur des données des Etats-Unis et du Royaume Uni, Kuznets (1955) a estimé que l'inégalité des revenus tendait à croître à de faibles niveaux de développement pour s'estomper par la suite, ce qui donne une relation qualifiée par la suite de « U-inversé » entre inégalité des revenus et PIB par habitant. L'analyse d'une relation hypothétique entre dégradations

environnementales et croissance économique trouve son origine dans les travaux de recherche réalisés par Kuznets (1955).

Plusieurs analyses de données soit en coupe transversale sur divers pays, soit en série temporelle, ont permis aux chercheurs de généraliser quelques résultats des trois effets conflictuels de la croissance économique sur l'environnement. Pour certaines variables environnementales, une relation « en cloche » apparaît : à un niveau faible de revenu par tête, la pollution est en règle générale faible ; à partir de là, la croissance économique induit une pollution de plus en plus intense jusqu'à ce que celle-ci se stabilise à un niveau de revenu intermédiaire, au-dessus duquel toute croissance supplémentaire se traduit par une amélioration de la qualité de l'environnement ; aux niveaux de revenu élevés, la pollution est relativement limitée. Toutefois, ces études n'utilisent pas les mêmes approches. Elles se sont basées sur l'hypothèse de EKC (Environmental Kuznets Curve), et le modèle gravitaire pour les unes et l'approche STIRPAT (Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology) pour les autres.

Grossman et Krueger (1991) sont les premiers à tester l'hypothèse EKC. Ces auteurs ont testé les impacts environnementaux de l'Accord de Libre-échange Nord-Américain (NAFTA) dans le cadre d'un panel. Les variables environnementales prises en compte sont le dioxyde de soufre (SO₂), les particules en suspension dans l'air (SPM). L'hypothèse EKC est vérifiée et le point de retournement (le niveau de revenu par tête à partir duquel les émissions atteignent leur pic), pour le SO₂ est compris entre 4000 \$ et 5000\$. En revanche, ce point de retournement est largement plus faible avec les particules en suspension. Ils ont, ensuite découvert (1993, 1995) cette particularité statistique, la CEK, pour un groupe de pays étudiés en coupe transversale, en mettant en évidence la relation de Kuznets pour la pollution urbaine de l'air (SO₂ et fumée) et plusieurs mesures de la pollution de l'eau.

Les travaux de Shafik and Bandyopadhyay (1992) ont porté sur le test de l'hypothèse CEK pour une dizaine d'indicateurs. Ils ont déterminé plusieurs formes de relation de ces indicateurs avec le revenu. Seule la variable, concentration de polluants dans l'air décrit avec le revenu une relation en forme de « U » inverse, le point de retournement étant compris entre 3000\$ et 4000\$. Les autres indicateurs décrivent une relation neutre (la déforestation), une relation linéaire positive (la qualité des rivières), une relation linéaire négative (le manque d'eau potable et le manque d'assainissement urbain). En revanche, dans le cas des émissions de CO₂, les résultats sont ambigus.

Newell et al. (1999), ont vérifiés l'hypothèse d'innovation induite de Porter (1991) et Porter et van Der Linde (1995) pour le cas des USA, les auteurs ont pris en compte les aspects de la régulation environnementale relatifs aux biens durables. Ils ont trouvé que le prix de l'énergie n'a aucun impact sur le taux d'innovation, alors que les modifications de prix ont un impact sur la commercialisation de nouveaux produits et sur l'élimination des anciens. Ils affirment que, les innovations sont en grande partie exogènes alors qu'une infime partie est liée aux modifications dans le prix de l'énergie.

Damania, Fredriksson et List (2003) analysent l'effet combiné de l'ouverture commerciale et la corruption sur la sévérité de la politique environnementale. D'après leurs résultats empiriques, l'ouverture commerciale augmente la sévérité de la politique, tandis que la corruption la réduit. Les effets des deux variables sont interdépendants. L'ouverture commerciale a un impact sur la politique environnementale plus important dans des pays avec des gouvernements plus corrompus. De plus, une réduction de la corruption a un effet plus grand sur la politique dans une situation d'autarcie.

Cole et Neumayer (2004) ont examiné le lien entre la taille de la population, les autres facteurs démographiques et deux polluants (CO₂ et SO₂). Ils ont trouvé qu'un fort taux d'urbanisation

augmente le taux d'émission de CO₂. Martinez-Zarzoso et Bengochea- Morancho (2004) ont utilisé un estimateur PMG et une fonction polynomiale de degré trois, pour examiner le lien entre les émissions de CO₂ et la croissance économique de 22 pays de l'OCDE de 1975 à 1998. Ils ont trouvé une courbe en forme de N pour la majorité des pays et affirment qu'après avoir atteint le point de retournement, le niveau d'émission de CO₂ baisse jusqu'à un certain seuil et continue d'augmenter au fur et à mesure que le niveau de produit intérieur brut par tête augmente.

Wei et al. (2006) ont examiné les déterminants des émissions de CO₂ à l'aide du modèle STIRPAT sur différents groupes de pays, classés en fonction de leur niveau de produit intérieur brut par tête. Ils ont démontré alors que, la proportion de la population dont l'âge est compris entre 15 et 64 ans exerce un effet négatif sur les émissions de CO₂ dans les pays à revenu faible, alors que l'effet est positif dans les autres groupes de pays. (Soytas et al., 2007) ont enquêté sur la consommation d'énergie, la production et les émissions de carbone aux États-Unis en utilisant un VAR selon l'approche de Yamada et Toda (1998). Après avoir intégré la formation brute de capital fixe ainsi que la main-d'œuvre dans le modèle, ils ont constaté une non-causalité au sens de Granger entre le revenu et les émissions de carbone et entre la consommation d'énergie et le revenu. Toutefois, leur étude a révélé une causalité unidirectionnelle au sens de Granger allant de la consommation d'énergie aux émissions de carbone. Examinant les relations dynamiques entre le développement économique, les émissions polluantes et la consommation de l'énergie pour le cas de la Malaysia, James B. et Ang (2008) ont trouvé une causalité bidirectionnelle entre la croissance de revenu et l'augmentation de l'utilisation de l'énergie à long terme et confirment l'existence d'une causalité unique partant de l'augmentation des émissions de CO₂ vers la croissance économique à long terme. Halicioglu (2009) trouve en utilisant les séries temporelles (1960-2005) et la méthode de Cointégration une dépendance des émissions de CO₂ à la consommation d'énergie, croissance économique et le commerce extérieur. Contrairement aux résultats précédents, (Ozturk et Acaravci, 2010) ne trouvent aucune relation de causalité entre les émissions de CO₂ et la consommation d'énergie en appliquant le modèle de Cointégration à retard échelonné. Menyah et Wolde-Rufael (2010), à l'aide d'une version modifiée du test de causalité de Granger, montrent au contraire l'existence d'une causalité unidirectionnelle allant des émissions polluantes à la croissance économique ; de la consommation d'énergie à la croissance économique et de la consommation d'énergie aux émissions de CO₂ en Afrique du Sud. Poumanyvong et Kaneko (2010) ont analysé l'impact de l'urbanisation sur l'utilisation minimale d'énergie et l'émission de CO₂ en estimant sur données de panel de 99 pays couvrant la période 1975 à 2005. Ils trouvent que l'impact de l'urbanisation sur la consommation d'énergie et l'émission de CO₂, varie en fonction du niveau de développement économique. Pour ces auteurs, l'urbanisation réduit la consommation d'énergie dans les pays à revenu faible alors qu'elle l'accroît dans les pays à revenu intermédiaire et élevé. Ils ont démontré que l'urbanisation influence positivement l'émission de CO₂ pour tous les groupes de pays, mais que l'impact est plus prononcé dans les pays à revenu intermédiaire que dans les autres groupes de pays.

Dans une étude semblable deux ans plus tard, Akpan et Akpan (2012) utilisent un modèle à correction d'erreur vectorielle pour analyser sur le long terme la relation entre la consommation d'énergie, la croissance économique et les émissions du CO₂ au Nigéria sur la période 1970-2008. Leurs résultats montrent que dans le long terme, la croissance économique est associée à une augmentation des émissions de carbone (unidirectionnelle), tout comme une augmentation de la consommation d'électricité conduit à une augmentation des émissions de carbone. Aucune relation n'a été trouvée entre la consommation d'électricité et la croissance économique. A partir des données sur la période 1980-2008 de la Chine et de la Thaïlande, Xing-Hong (2012) analyse, à l'aide d'un modèle VAR, du test de Cointégration de Johanssen et du test de causalité de Granger, les relations de long et de court

terme entre la consommation d'énergie, les émissions de carbone et la croissance économique. Il trouve qu'aussi bien en Chine qu'en Thaïlande, il existe un équilibre de long terme entre la consommation d'énergie, les émissions de carbone et la croissance économique.

Par ailleurs, la croissance économique est unidirectionnelle et cause au sens de Granger les émissions de carbone en Chine et la consommation d'énergie en Thaïlande. Selon Alkhatlan et Javid (2013), il existe une relation de court et de long terme entre la croissance économique, les émissions de CO₂, la consommation d'énergie en Arabie Saoudite. Leurs résultats indiquent que ni les émissions de carbone par tête, ni la consommation d'énergie par tête, ne causent le PIB par tête au sens de Granger. Mais sur le court terme, le taux de chômage cause le PIB par tête. Cependant, l'élasticité-revenu de long terme des émissions de carbone est supérieure à l'élasticité-revenu de court terme des émissions de carbone, ce qui implique que sur le long terme, le revenu contribue fortement à l'augmentation des émissions de CO₂ dans le pays. Pour Olatunji et al., (2014), en Malaisie il existe une relation de long terme entre la croissance économique, l'ouverture commerciale, les progrès techniques et les émissions de carbone. Les résultats de l'analyse de Granger par contre montrent une relation de long et court terme allant des progrès techniques vers la réduction des émissions de carbone.

3. Démarche méthodologique

Cette section comporte deux rubriques. La première porte sur la méthodologie, et le second sur les résultats des estimations et leurs interprétations.

3.1. Le modèle théorique

La difficulté des études sur l'évolution de la qualité de l'environnement ne réside pas uniquement dans la diversité des indicateurs (indicateurs de la qualité de l'air, de l'eau, etc.). La complexité de l'environnement fait que divers facteurs directs et/ou indirects concourent à sa dégradation.

Le modèle théorique utilisé dans cette partie s'inspire de l'approche STIRPAT (Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology) ou l'équation de Kaya (1990), élaboré à l'origine par Ehrlich et Holden (1971 ; 1972) avec quelques aménagements pour prendre en compte l'endogénéité des variables. En effet, l'approche STIRPAT ou l'équation de Kaya a été développée pour expliciter initialement les déterminants des émissions de CO₂. Elle est exprimée par l'équation $I = P.A.T$ et signifie que l'impact environnemental (I) est le produit de la taille de la population (P), son niveau de richesse (A), exprimé en revenu par habitant, et un facteur représentant la technologie (T). Cette équation est équivalente pour les émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'équation de Kaya, qui décompose la croissance des émissions de GES en une somme de quatre taux de croissance : celui de la population, du PIB par tête, de l'intensité énergétique (c'est-à-dire la consommation d'énergie primaire par unité de PIB) et de l'intensité carbonique (c'est-à-dire le niveau d'émissions de gaz à effet de serre ou GES par unité de consommation d'énergie primaire). De façon générale, dans le cas de cette étude, le modèle STIRPAT peut s'écrire sous la forme initiale suivante :

$$Z_t = \alpha_0 Y_t^{\alpha_1} K_t^{\alpha_2} L_t^{\alpha_3}$$

Z_t représente la variable environnementale, Y représentant le niveau de Richesse du pays (PIB), L la taille de la population. K le stock de capital ou la formation brute de capital, et $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, des paramètres. Le temps est représenté t .

En prenant en compte certains aménagements, l'endogénéité et le logarithme népérien des variables, la fonction à estimer pour analyser le lien entre les émissions du CO₂, et la croissance économique selon

l'hypothèse EKC telle que proposée par Grossman et Krueger (1991) est empiriquement testée en estimant l'équation définit ci-après

$$\log Z_t = \alpha_0 + \beta_1 \log Y_t + \beta_2 \log X_t + \mu_t \quad (1)$$

Où Z_t représente la variable environnementale, Y_t le revenu par tête, X_t désigne toute autre variable qui peut influencer la dégradation de l'environnement (l'aire, l'eau etc). μ_t le terme d'erreur supposé indépendant et identiquement distribué (i.i.d) α est une constante et β_k sont les Coefficients des k variables explicatives.

Sous l'hypothèse de la CEK, la principale relation à tester est celle qui existe entre le revenu et l'environnement ; le vecteur X_t est alors considéré comme constant. En définitive la relation suivante sera testée : $Z_t = f(Y_t)$.

3.2. Spécification du modèle

Nous présentons le modèle EKC que nous estimons pour le Mali. Nous partons de l'équation de base (1) où la variable environnementale est expliquée par le produit intérieur brut en incluant la forme quadratique, mais aussi des variables de contrôle. Il se présente comme suit :

$$\log CO_{2t} = \alpha_i + \beta_1 \log(PIB)_t + \beta_2 \log(PIB)_t^2 + \beta_3 \log(DENSP)_t + \beta_4 \log(OUVC)_t + \beta_5 \log(IND)_t + \mu_t$$

Où la variable CO2 représente les émissions de dioxyde de carbone par tête. Les variables PIB, PIB2 sont le revenu par tête et sa forme quadratique. La variable (DENSP) est la densité de la population. OUVC est le degré d'ouverture de l'économie ($I + E / PIB$), IND est la part de l'industries dans le PIB, Le terme α_i représenté les effets spécifiques inobservés du pays et μ_t est le terme d'erreur. Les β_t , $t = 1, \dots, 5$ sont les coefficients à estimer.

Dans cette relation, il est particulièrement important de savoir comment évolue l'expression $\Delta CO_{2t} = \Delta Y_t$ (Y_t désigne le PIB et sa forme quadratique). Cette dernière représente la dérivée première de CO_{2t} par rapport à Y_t . Au seuil de revenu où l'environnement commence à perdre sa qualité, cette dérivée est nulle. Elle s'établit comme Suit : $\frac{\Delta CO_{2t}}{\Delta Y_t} = \beta_1 + 2 \beta_2 Y$

Au seuil critique, c'est-à-dire au niveau où la dégradation de l'environnement devient maximale, on a : $\frac{\Delta CO_{2t}}{\Delta Y_t} = 0$ ou $\beta_1 + 2 \beta_2 Y = 0$ alors $Y = -\frac{\beta_1}{2\beta_2}$

Le revenu étant une grandeur positive, cette égalité suppose que les coefficients β_1 et β_2 soient de signe contraire.

3.3. Variables, signes attendus et sources des données

3.3.1. Variables

- La variable dépendante est les émissions du dioxyde de carbone CO2
- Les variables explicatives sont le PIB par habitant, la densité de la population (DENSP), le degré d'ouverture de l'économie OUVC, la part de l'industrie dans le PIB IND.

3.3.2. Signes attendus

Dans le cadre de ce travail de recherche les signes attendus des variables sont consignés dans le tableau1.

Tableau 1 : Signe attendu des variables explicatives

Variables	Signes
PIB	(+)
DENSP	(+)
OUVC	(+)
IND	(+)

Source : Auteurs

3.3.3. Sources des données

Pour faire tourner le modèle nous utiliserons des données de type secondaire (sur au plus 30 ans) en séries temporelles.

Les données sont collectées dans World Développement Indicator (WDI), 2018.

3.4. Validité du modèle

3.4.1. Test de stationnarité de Dickey-Fuller (ADF)

Ce test permet de juger de la stationnarité des données. La méthode de moindres carrés ordinaires ne sera utilisable que si toutes les variables sont stationnaires à niveau.

La règle de décision pour ce test est la suivante :

- Si la statistique ADF est inférieure à la valeur tabulée au seuil alpha, l'hypothèse nulle de non stationnarité est rejetée. Les résidus de la relation statistique sont stationnaires : les variables sont cointégrées.
- Si la statistique ADF estimée est supérieure ou égale à la valeur tabulée au seuil alpha. Les résidus de la relation statistique ne sont pas stationnaires : les variables ne sont pas cointégrées.

❖ Détermination de la nature de stationnarité : Processus TS et DS par le test de racine unité de Dickey Fuller

Processus TS (Trend Stationary) présente une stationnarité de nature déterministe. Il représente une stationnarité de type déterministe. Dans ce type de modélisation, l'effet produit par un choc à un instant t est transitoire. Pour stationnariser un processus TS, la bonne méthode est celle des Moindres Carrés Ordinaires (MCO).

Les processus DS (Différence Stationary) présente une non stationnarité de nature stochastique. Il est dit DS car on le stationnarise par la différence première. Ce processus est intégré d'ordre 1 car sa différence est le processus bruit blanc qui est stationnaire. Pour stationnariser un processus DS il faut employer le filtre aux différences. Le choix d'un processus DS ou TS comme structure de la chronique n'est donc pas neutre.

Tableau 2: Analyse du processus TS

Variables	Coefficients retard	Valeurs lues
		Modèle (3) tendance
PIB	0.001380	3.25
PIB2	0.010135	
OUVC	0.020270	
DENSP	0.035246	
IND	0.000493	
PIB	0.002047	

Source : Auteurs, à partir des données WDI, 2018

Les résultats du test de racine unité montrent que pour toutes les variables, la valeur de la statistique lue sur la table Dickey- Fuller (ADF) est supérieure au coefficient de la tendance, donc, l'hypothèse d'un processus à tendance déterministe (TS) est rejetée car le coefficient de la tendance n'est pas statistiquement significatif. La statistique ADF est supérieure à tout le seuil cela vient confirmer les résultats de l'analyse graphique. En effet, les séries ne sont pas stationnaires en niveau.

Tableau 3 : Analyse processus DS

VARIABLES	Coefficients constante	Valeurs lues
CO2	0.003889	2.97
PIB	0.162004	
PIB ²	0.324009	
OUVC	0.214684	
DENSP	0.000142	
IND	0.424834	

Source : Auteurs, à partir des données WDI, 2018

Les résultats du test de racine unité montrent que pour toutes les variables, la valeur de la statistique lue sur la table Dickey- Fuller (ADF) est supérieure au coefficient de la constance, les séries ne sont pas affectées par une constance, car les coefficients de la constance ne sont pas statistiquement significatifs. Il s'agit d'un processus DS sans dérive.

Tableau 4 : Résultat du test ADF (seuil 5%) / variable en niveau

VARIABLES	ADF stat	Valeurs critique
CO2h	-1.898140	-3.5312
PIB	-2.130760	-3.5312
PIB ²	-2.130760	-3.5312
OUVC	-1.856383	-3.5312
DENSP	-2.516019	-3.5312
IND	-1.514609	-3.5312

Source : Auteurs, à partir des données WDI, 2018

Tableau 5 : Résultat du test ADF (seuil 5%) / variable en différence première

VARIABLES	ADF stat	Valeurs critique
CO2h	-3.8994	-1.9501
PIB	-3.6391	-1.9501
PIB ²	-3.6391	-1.9501
OUVC	-4.1438	-1.9501
DENSP	-3.7222	-2.9511
IND	-5.4176	-1.9501

Source : Auteurs, à partir des données WDI, 2018

Tableau 6 : Conclusion du test de stationnarité ADF

Variabes	Stationnaire niveau	Stationnaire en différence
CO2h		I (1)
PIB		I (1)
PIB ²		I (1)
OUVC		I (1)
DENSP		I (1)
IND		I (1)

Source : Auteurs, à partir des données WDI, 2018

Les résultats du tableau 4 montrent que, pour toutes les séries, les valeurs de la statistique ADF est supérieure à la valeur critique au seuil de 5%, alors les séries ne sont pas stationnaires en niveau. Par contre, les résultats du tableau 5 montrent que les valeurs de la statistique ADF est inférieure à la valeur critique au seuil de 5%, alors les séries sont donc stationnaires en différence première ; elle est intégrée d'ordre un (1). La méthode des Moindres Carrés Ordinaires n'est plus appropriée pour étudier le phénomène. En effet, la cointégration et modèle à correction d'erreur peut être utilisé dans le cadre de cette étude.

$$\log CO_{2t} = \beta_1 \log(CO_{2t-1}) + \beta_0 + \beta_2 \log(PIB)_t + \beta_3 \log(PIB)_t^2 + \beta_4 \log(DENSP)_t + \beta_5 \log(OUVC)_t + \beta_6 \log(IND)_t + \mu_t$$

Par ailleurs puisque toutes les variables sont stationnaires en différence première pour estimer le modèle nous allons procéder par le test de Cointégration de Johansen.

3.4.2. Autres tests

❖ Test de Student (La plupart des variables explicatives sont explicatives)

L'hypothèse du test est la suivante :

H₀ : le coefficient β_i associé à la variable X_i est nul

Contre

H₁ : le coefficient β_i associé à la variable X_i est différent de 0

La règle de décision est la suivante :

- On ne rejette pas l'hypothèse H₀ si la valeur de la probabilité est supérieure au seuil alpha, alors la variable X_i n'a pas un impact significatif sur la variable endogène Z_i.
- On rejette l'hypothèse H₀ si la valeur de la probabilité est inférieure au seuil alpha, alors la variable X_i a un impact significatif sur la variable endogène Z_i.

Les probabilités critiques associées aux variables PIB, OUVC, IND sont supérieures à tous les seuils conventionnels. Ces variables n'ont pas un impact significatif sur les émissions de CO₂ au Mali. Par contre, la probabilité associée à la variable densité de la population est nulle. On rejette au seuil de 1% l'hypothèse H₀. La densité de la population a un impact significatif sur les émissions de CO₂ au Mali.

❖ Significativité globale du modèle (Fisher)

H₀ : le modèle n'est pas globalement significatif

Contre

H₁ : le modèle est globalement significatif

La statistique de Fisher vaut 91.25, sa probabilité critique (F-statistique), est égale à zéro. L'hypothèse H_0 est rejetée au seuil de 1%. Les variables PIB, OUVC, DENSP, IND ont globalement un impact significatif sur les émissions de CO₂. Le modèle est globalement significatif. Le coefficient de détermination $R^2 = 0.912$ indique que les variables utilisées expliquent 91,2% des fluctuations du logarithme des émissions du CO₂ sont expliqué par les logarithmes du PIB, de OUVC, de la DENSP et de IND.

❖ Test hétéroscédasticité des erreurs (test : Breusch-Pagan)

H_0 : les erreurs du modèle sont homocédastiques

Contre

H_1 : les erreurs du modèle sont hétéroscédastiques

Règle de décision est la suivante :

- Si la probabilité du test est supérieure à tous les seuils conventionnels, alors on ne rejette pas l'hypothèse nulle. Les erreurs du modèle sont homocédastiques.
- Si la probabilité du test est inférieure à tous les seuils conventionnels, alors on rejette l'hypothèse nulle. Les erreurs du modèle sont hétéroscédastiques.

Testons l'hétéroscédasticité conditionnelle.

Tableau 7: Heteroskedasticity Test: Breusch-Pagan-Godfrey

F-statistic	0.855631	Prob. F(4,35)	0.5000
Obs*R-squared	3.563037	Prob. Chi-Square(4)	0.4684
Scaled explained SS	0.887510	Prob. Chi-Square(4)	0.9263

Source : Auteurs, à partir de STATA

Le résultat du test montre que la probabilité du test (0,468) est supérieure à tous les seuils conventionnels. On ne rejette pas l'hypothèse nulle. Les erreurs du modèle sont homocédastiques.

❖ Test d'hétéroscédasticité conditionnelle des erreurs (test ARCH)

H_0 : les erreurs ne suivent pas un modèle ARCH d'ordre 1, alors elles sont homocédastiques

Contre

H_1 : les erreurs suivent un modèle ARCH d'ordre 1, alors elles sont conditionnellement hétéroscédastiques

Règle de décision est la suivante :

- Si la probabilité du test est supérieure à tous les seuils conventionnels. On ne rejette pas l'hypothèse nulle. Les erreurs ne suivent pas un modèle ARCH d'ordre 1. L'hypothèse d'hétéroscédasticité conditionnelle sera rejetée.
- Si la probabilité du test est inférieure à tous les seuils conventionnels. On rejette l'hypothèse nulle. Les erreurs suivent un modèle ARCH d'ordre 1. Les erreurs sont conditionnellement hétéroscédastiques.

Testons l'hétéroscédasticité conditionnelle.

Tableau 8 : Heteroskedasticity Test: ARCH

F-statistic	9.944941	Prob. F(1,37)	0.0032
Obs*R-squared	8.261864	Prob. Chi-Square(1)	0.0040

Source : Auteurs, à partir de STATA

La probabilité du test est inférieure à tous les seuils conventionnels. On rejette l'hypothèse nulle. Les erreurs du modèle suivent un modèle ARCH d'ordre 1. L'hypothèse d'hétéroscédasticité conditionnelle est acceptée les erreurs du modèle sont hétéroscédastiques.

❖ **Test de corrélation d'ordre 1 des erreurs (test de Breusch-Godfrey)**

Le test d'hypothèses est :

H_0 : les erreurs ne sont pas corrélées

Contre

H_1 : les erreurs sont corrélées

Règle de décision est la suivante :

- Si la probabilité du test est inférieure à 5%. On rejette l'hypothèse nulle. Les erreurs sont corrélées du premier ordre
- Si la probabilité du test est inférieure à 5%. On ne rejette pas l'hypothèse nulle les erreurs ne sont pas corrélées

Testons l'autocorrélation d'ordre 1 des erreurs.

Tableau 9: Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test

F-statistic	10.62833	Prob. F(2,33)	0.0003
Obs*R-squared	15.67119	Prob. Chi-Square(2)	0.0004

Source : Auteurs, à partir de STATA

La probabilité du test est nulle, inférieure à tous les seuils conventionnels. On rejette l'hypothèse nulle. Les erreurs du modèle sont corrélées du premier ordre.

❖ **Test de spécification du Modèle (test de Ramsey)**

H_0 : le modèle est bien spécifié

Contre

H_1 : le modèle est mal spécifié

Règle de décision est la suivante :

Si les deux probabilités (F-statistic et Likelihood ratio) sont inférieures au seuil de 5%, on accepte l'hypothèse H_1 . Le modèle est mal spécifié. Par contre, Si les deux probabilités (F-statistic et Likelihood ratio) sont supérieures au seuil de 5%, on accepte l'hypothèse nulle. Le modèle est bien spécifié.

Testons la spécification du modèle

Tableau 10 : Test de Ramsey

Ramsey RESET Test

Equation: EQ02

Specification: LCO2 C LPIB LOUVC LDENSP LIND

Omitted Variables: Squares of fitted values

	Value	df	Probability
t-statistic	0.699968	34	0.4887
F-statistic	0.489955	(1, 34)	0.4887
Likelihood ratio	0.572304	1	0.4493

Source : Auteurs, à partir de STATA

Les probabilités du test sont supérieures à tous les seuils conventionnels. On accepte l'hypothèse nulle. Le modèle est bien spécifié.

❖ Test de Stabilité (test : Chow)

H_0 : les coefficients du modèle sont stable

Contre

H_1 : les coefficients du modèle sont instable

La règle de décision est suivante :

- Si F^* (Fisher empirique) < F_{lu} (valeur seuil sur la table), l'hypothèse H_0 n'est pas rejetée et on retient une estimation par les moindres carrés ordinaires avec l'ensemble des observations (les coefficients sont dits stables sur l'ensemble de la période)
- Si F^* (Fisher empirique) $\geq F_{lu}$ (valeur seuil sur la table), l'hypothèse H_0 est rejetée. Les coefficients ne sont pas stables sur l'ensemble de la période.

Tableau 11 : Test de Stabilité (test : Chow)

Chow Breakpoint Test: 1994

Null Hypothesis: No breaks at specified breakpoints

Varying regressors: All equation variables

Equation Sample: 1975 2014

F-statistic	3.879151	Prob. F(5,30)	0.0079
Log likelihood ratio	19.94668	Prob. Chi-Square(5)	0.0013
Wald Statistic	19.39575	Prob. Chi-Square(5)	0.0016

Source : Auteurs, à partir de STATA

Les probabilités du test sont inférieures à tous les seuils conventionnels. On rejette l'hypothèse nulle. Le modèle est instable. L'année de la dévaluation (1994) est une date d'instabilité pour l'économie malienne.

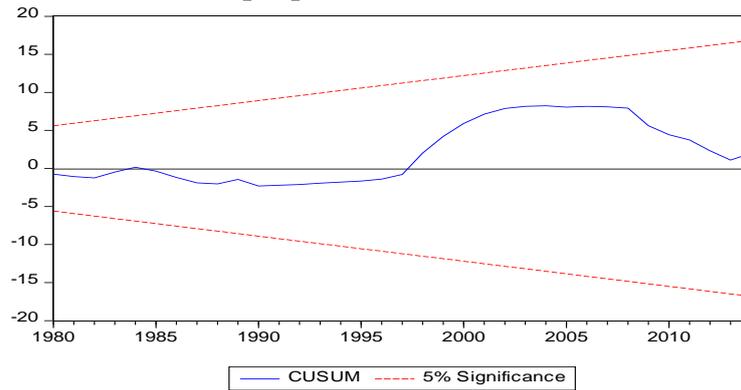
❖ Test Cusum de Stabilité des paramètres

La règle de décision est la suivante :

- Si la courbe ne coupe pas les bornes du corridor alors le modèle est stable.
- Si la courbe coupe les bornes du corridor alors le modèle est bien instable. Dans ce cas, la courbe indique la période d'instabilité.

Testons la stabilité des paramètres.

Graphique 1 : Test de Cusum



Source : Auteurs, à partir de STATA

La courbe ne coupe pas le corridor, le modèle est structurellement stable

❖ Test de contrainte

Les hypothèses du test (statistique de chi-deux) sont :

$H_0 : A(i, j) = 0$, (probabilité > 5% : la variable considérée est faiblement exogène

$H_1 : A(i, j) \neq 0$ (probabilité < 5% : la variable considérée n'est pas faiblement exogène

Les résultats du test sont résumés dans le tableau 12.

Tableau 12 : Test de contrainte

Cointégration Restrictions					
	A(1,1)=0	A(2,1)=0	A(3,1)=0	A(4,1)=0	A(5,1)=0
Chi-square(1)	1.021193	0.420581	1.560272	6.606303	0.683154
Probability	0.312236	0.516647	0.211625	0.010162	0.408503
Décision	accepte Ho	accepte Ho	accepte Ho	rejet Ho	accepte Ho
Not all cointégration vectors are identified					
LR test for binding restrictions (rank = 1):					

Source : Auteurs, à partir de STATA

Les résultats des tests ci-dessus ne confirment pas l'exogénéité faible de la variable « DENS ». Par contre, il met en évidence l'exogénéité faible des variables (PIB, OUVC et IND) à présent, tenant compte de ces résultats, nous estimons à nouveau un VECM partiel ou contraint.

❖ Test de corrélation des erreurs de Breusch-Godfrey

H_0 : les erreurs du modèle à correction ne sont pas corrélées

Contre

H_1 : les erreurs du modèle à correction d'erreurs sont corrélées

Règle de décision est la suivante :

- Si les deux probabilités critiques sont nulles, nous rejetons l’hypothèse nulle au seuil de 1%. Les erreurs du modèle à correction d’erreur sont corrélées d’ordre 1.
- Si les deux probabilités critiques sont supérieures au seuil de 1%. Nous acceptons l’hypothèse H1. Les erreurs du modèle à correction d’erreurs sont corrélées d’ordre 1.

Testons la corrélation des erreurs d’ordre 1.

Tableau 13 : Test de corrélation des erreurs de Breusch-Godfrey

Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test:

F-statistic	0.334169	Prob. F(1,33)	0.5671
Obs*R-squared	0.390968	Prob. Chi-Square(1)	0.5318

Source : Auteurs, à partir de STATA

Les probabilités critiques du test (0,56 et 0,53) sont supérieures à tous les seuils conventionnels. Hypothèse de non corrélation des erreurs est acceptée. Les erreurs du modèle ne sont pas corrélées.

Tableau 14 : Test de Johansen

Date: 12/28/20 Time: 13:38					
Sample: 1975 2014					
Included observations: 37					
Series: DCO2 DPIB DOUVC DDENSP DIND					
Lags interval: 1 to 1					
Selected (0.05 level*) Number of Cointegrating Relations by Model					
Data Trend:	None	None	Linear	Linear	Quadratic
Test Type	No Intercept	Intercept	Intercept	Intercept	Intercept
	No Trend	No Trend	No Trend	Trend	Trend
Trace	4	3	4	3	5
Max-Eig	4	1	1	3	3
*Critical values based on Osterwald-Lenum (1992)					
Information Criteria by Rank and Model					
Data Trend:	None	None	Linear	Linear	Quadratic
Rank or	No Intercept	Intercept	Intercept	Intercept	Intercept
No. of CEs	No Trend	No Trend	No Trend	Trend	Trend
Log Likelihood by Rank (rows) and Model (columns)					
0	212.2605	212.2605	212.9093	212.9093	213.5604
1	230.3383	232.4569	233.0776	233.0782	233.6541
2	242.3623	245.8788	246.4986	252.7945	253.2333
3	253.0422	256.5633	257.1361	266.0685	266.1845
4	260.1044	263.6876	264.2599	273.2609	273.2960
5	260.3726	264.9243	264.9243	275.5367	275.5367
Akaike Information Criteria by Rank (rows) and Model (columns)					
0	-10.12219	-10.12219	-9.886987	-9.886987	-9.651915
1	-10.55883	-10.61929	-10.43663	-10.38260	-10.19752
2	-10.66823	-10.75020	-10.62155	-10.85376	-10.71532
3	-10.70498	-10.73315	-10.65601	-10.97668*	-10.87484
4	-10.54618	-10.52365	-10.50054	-10.77086	-10.71871
5	-10.02014	-9.995910	-9.995910	-10.29928	-10.29928

Source : Auteurs, à partir de STATA

Il ressort du test de cointégration de Johansen, qu'il existe trois relations de cointégration suivant le critère d'Akaike. Akaike offre la valeur la plus minimale pour No of CES égal à « 3 ». La valeur minimale d'Akaike (soit : -10.97668*) apparaissant sur la colonne où le caractéristique Test type est « Intercept and trend (linear) », l'on déduit la forme de notre modèle à estimer : il s'agit d'une équation linéaire de cointégration avec intercepte et tendance. En effet, Sur la base de ces informations (surtout la forme du modèle), nous allons reprendre la procédure en spécifiant la forme de notre modèle (soit en précisant les hypothèses que l'on fait sur la présence ou non de l'intercepte et du trend dans le VAR ou le VECM retenu) comme suit.

3.4.3. Résultats de l'estimation

Cette rubrique présente les résultats de l'estimation du modèle à correction d'erreur.

Tableau 15 : Résultat de l'estimation de long terme

Estimations modèle à correction d'erreur (relation de long terme)	
Equations de cointégration	CointEq1
LCO2(-1)	1.000000
LPIB(-1)	0.439334
PIB2(-1)	-2.96E-07
LOUVC(-1)	0.106667
LDENSP(-1)	-2.283349

Source : Auteurs, à partir de STATA

Les résultats de l'estimation du VECM, l'on note que les coefficients des termes de force de rappel des variables « CO2, PIB et OUVC » sont les signes attendus (négatifs), par contre celui de la variable « DENSP » n'est pas le signe attendu. En outre, sauf le coefficient de la variable DENSP, tous les autres coefficients de la « relation de long terme » sont statistiquement significatifs ; par contre, les forces de rappel associée à l'équation des variables « CO2, PIB, OUVC et DENSP » sont statistiquement significatives. Le R2 du VECM estimé est aussi faible, ce qui traduit l'omission de certaines variables explicatives pertinentes). Il en ressort que la variable « DENSP », statistiquement non significatives, sont « faiblement exogènes ». Pour en être convaincu, l'on peut procéder par un « test de contrainte » ou « test d'exogénéité faible » sur les coefficients de nos variables sous étude. Pour ce faire, estimer le VECM en précisant des restrictions [A (1,1) =0 ; A (2,1) =0 ; A (3,1) =0 ; A (4,1) et A (5,1)].

3.4.4. Interprétation économique du coefficient de correction d'erreur

Les résultats de l'estimation du vecteur à correction d'erreur, par la méthode du maximum de vraisemblance, On constate que le coefficient associé à la force de rappel est négatif (-0,63) et significativement différent de zéro au seuil de 5%. Le modèle à correction d'erreur est accepté. Il existe bien un mécanisme à correction d'erreur : à long terme le déséquilibre entre les émissions de CO2 et le PIB/ habitant, ouverture commerciale (OUVC) la densité de la population (DENSP) et la part de l'industrie dans le PIB (IND) se compensent de sorte que les cinq séries ont des évolutions similaires.

Le coefficient β_5 est le coefficient de correction d'erreur. β_5 représente la vitesse à laquelle tout déséquilibre entre les niveaux désiré et effectif des émissions du dioxyde de carbone (CO2) est résorbé dans l'année qui suit tout choc.

$\beta_5 = -0,63$ alors on arrive à ajuster 63% du déséquilibre entre les niveaux désirés et effectifs des émissions de CO₂. 63% des effets d'un choc intervenu une année donnée sont résorbés dans l'année qui suit tout choc. Ainsi, les chocs sur les émissions de CO₂ du Mali se corrigent-ils à 63% par effet de « feed Back ». En d'autres termes, un choc constaté au cours d'une année est entièrement résorbé au bout de un (1) ans et 6 mois environs ($1/0,63 = 1,58$ années).

❖ Relations de court terme de la variable dépendante et les variables explicatives

Le coefficient de la relation de court terme des émissions de CO₂ par rapport au PIB/ habitant est $\beta_1 = 0,32$. Si le PIB du Mali augmenté d'un point (1%) alors les émissions de CO₂ à court terme augmentent de 32,4%.

Le coefficient de la relation de court terme des émissions de CO₂ par rapport à l'ouverture commerciale est $\beta_2 = 2,10$. En effet, l'ouverture commerciale a d'impact significatif sur les émissions de CO₂ au Mali. Si le taux d'ouverture commerciale du Mali augmente de 10% alors les émissions du CO₂ au Mali augmentent de 21 %.

Le coefficient de la relation de court terme des émissions de CO₂ par rapport à la densité de la population est $\beta_3 = -0,002$. A court terme la densité de la population n'a pas un impact significatif sur les émissions de CO₂ au Mali.

❖ Relations de long terme de la variable dépendante et les variables explicatives

Le coefficient de la relation de long terme des émissions de CO₂ par rapport au PIB est : 0,43 et le coefficient du PIB² est - 2,96 ; Si le PIB du Mali augmente de 10%, alors les émissions du CO₂ à long terme diminuent de 29%. Le coefficient de la relation de long terme des émissions de CO₂ par rapport au degré d'ouverture commerciale est : 0,10. Si le degré d'ouverture de l'économie du Mali augmente de 10%, alors les émissions de CO₂ à long terme diminuent de 1,06%. Le coefficient de la relation de long terme des émissions de CO₂ par rapport à la densité de la population est : -2,28. Si la densité de la population augmente de 10%, alors les émissions de CO₂ à long terme augmentent de 20,01%.

❖ Analyses économiques

Le signe attendu du coefficient de la variable PIB dans le cadre de cette étude était positif. Cependant, suite aux estimations réalisées, il s'est avéré que le signe du coefficient de la variable PIB est positif. Par contre, le signe du coefficient de la forme quadratique du PIB est négatif. D'une part, Ce résultat n'est pas surprenant car le pays compte très peu d'industries lourdes qui sont réputées être émetteurs de dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre. L'économie est fortement dépendante du secteur primaire et tertiaire. D'autre part, ce résultat est conforme avec l'hypothèse de la CEK. A long terme, il existe donc une relation de compensation entre les émissions de CO₂ et le revenu par tête au Mali. En d'autres termes, la croissance portera des dommages à l'environnement dans un premier temps. Ensuite, l'augmentation du revenu qui découlera de cette phase, engendrera des effets qui amélioreront la qualité de l'environnement.

Le signe attendu du coefficient des variables densité de la population (DENSP) et degré d'ouverture de l'économie (OUVC) étaient supposés positifs. Après estimation, nous constatons que les coefficients des variables OUVC confirme le signe attendu positif (+). Par contre, on se rend compte que le signe du coefficient de la variable densité de la population est négatif. La densité de la population a donc un effet positif sur les émissions de CO₂. Ce résultat vient confirmer l'hypothèse de (Grossman et Krueger 1991) que « *les pauvres ont une faible demande de qualité de l'environnement, sont contraints par leurs besoins de consommation présents à dégrader l'environnement* ». Dans les

villes du Mali, cette relation peut s'expliquer par le fait que l'augmentation de la population entraîne une hausse de la demande de transport et de la consommation d'énergie fossile, et par conséquent une augmentation des rejets de gaz polluant dans l'atmosphère. Dans les campagnes, l'accroissement de la population engendre une hausse de l'utilisation des énergies traditionnelles (charbon de bois, bois de feu) et donc des émissions de CO₂.

L'ouverture commerciale, contrairement à la théorie semble avoir un impact positif sur les émissions de CO₂. De même la structure de l'économie influence positivement les émissions de CO₂. Cependant ces deux variables explicatives n'ont pas une influence significative au Mali sur le modèle au seuil de 5%.

4. Conclusion

Dans le cadre de ce travail de recherche, nous avons cherché à déterminer les causes des émissions de CO₂ au Mali. Les résultats obtenus montrent que, le coefficient de la relation de long terme des émissions de CO₂ par rapport au PIB est positif (0,5). Par contre, le coefficient de la relation de long terme des émissions de CO₂ par rapport à la densité de la population est négatif (-2,01). Ces résultats indiquent d'une part l'existence d'une courbe en U inversé entre l'environnement et la croissance économique car la force de rappel est inférieure à zéro. Les émissions de CO₂ augmentent avec le revenu à court terme. Mais à long terme la pression sur l'environnement pris en compte par ces indicateurs s'amointrit avec la croissance économique. D'autre part, la pression anthropique exercée sur les ressources naturelles et le mode de consommation énergétique des populations sont les principaux facteurs de dégradation de la qualité de l'environnement. En effet, comme l'a indiqué Dinda (2004), il est très important pour les autorités responsables des politiques environnementales de comprendre la théorie de l'évolution de la qualité de l'environnement. Ce qui donne une importance particulière à la recherche de la forme de la relation entre le produit intérieur brut et la dégradation de l'environnement. Cette question est traitée depuis très longtemps. Avant les années 1970, l'idée soutenue était que la consommation des ressources naturelles (y compris l'Energie) évoluait au même rythme que la croissance économique. A partir de 1970, les économistes du Club de Rome proposent de limiter la croissance économique pour éviter des problèmes environnementaux futurs. Au début des années 1990, Grossman et Krueger (1991) ont déterminé une relation entre la qualité de l'environnement et le revenu par tête en forme de « U » inversé c'est l'EKC. Selon cette hypothèse, la dégradation de l'environnement s'accélère d'abord jusqu'à un certain niveau du revenu par tête puis baisse.

Cole et al. (1997), ont mis la différence entre les seuils sur le compte de l'extension de l'impact des indicateurs. Les indicateurs ayant des impacts indirects ou dont les coûts peuvent être externalisés (CO₂ par exemple) affichent souvent des sommets à des niveaux de revenu très élevés. Ceux dont des impacts sont localisés ou dont les coûts sont supportés par les pollueurs, ont des points de rupture à des niveaux de revenu plus bas. Face à ce risque, la soutenabilité dans l'exploitation des ressources naturelles doit être prise en compte à toutes les étapes du processus de développement.

Pour cela, il est nécessaire que les mesures suivantes soient entreprises :

Mettre l'accent sur l'éducation environnementale pour engager les responsabilités individuelle et collective, et induire par ce fait des comportements propices au développement durable ; favoriser une croissance économique soutenable pour permettre une augmentation considérable du revenu des populations ; améliorer l'efficacité dans l'utilisation des ressources naturelles et de l'environnement ; Soutenir les investissements dans les nouvelles technologies, pour promouvoir le développement durable.

REFERENCES

1. Agence de l'Environnement et du Développement Durable, 2012. Rapport national sur le développement durable au Mali Dans la perspective de RIO+20 [en ligne]. Environnement. 2012, 54 pages. Disponible sur <https://www.sustainabledevelopment.un.org/content/documents/983mali.pdf>
2. Anamika Barua et Hubacek Klaus, 2009. An empirical analysis of the environmental Kuznets curve for water pollution in India. February 2009, University of Leeds, Leeds, UK, International Journal of Global Environmental Issues Vol. 9, Nos. 1/2, 2009. online at <https://www.researchgate.net/publication/24017886>
3. Andrés Abanto Florida, 2013. Développement durable, enjeux et problématiques autour de la grande entreprise minière : le cas de la province de Cajamarca – Pérou. [en ligne]. Thèse Doctorale en Administration. Montréal : Université Du Québec.
4. Beckerman, W. (1992). Economic Growth and the Environment: Whose Growth Whose Environment? World Development, 20, 481-496.
5. Beckerman, W. (1993) The environmental limits to growth : a fresh look In H Giersch (Ed), Economic Progress and Environment concerns. Berlin: Springer
6. Bertrand Hamaide, Sylvie Fauchoux, Martin Neve et Martin O'Connor 2012. Croissance et environnement : la pensée et les faits. Avril 2012, Cairn.info pour De Boeck Supérieur, 17 pages. Disponible sur <https://www.cairn.info/revue-reflets-et-perspectives-de-la-vie-economique-2012-4-page-9.htm>
7. Chien-Chiang Lee et Chun-Ping Chang, 2005. The impact of energy consumption on economic growth: Evidence from linear and nonlinear models in Taiwan. 14 June 2005, Department of Applied Economics, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan : Taiwan, Kaohsiung, 18 pages . online at www.elsevier.com/locate/energy.
8. Cole, M.A, Rayner, A J., & Bates, J.M (1997). The environmental Kuznets curve: empirical analysis. Environment and Development Economics, 2 401-416.
9. Engle R. F. and Granger C. W. J, 1987: "Cointegration and Error-Correction: Representation, Estimation and Testing", Econometrica, vol. 64.
10. Fisher M. M. and Stirbock C, 2004: "Regional income convergence in the enlarged Europe, 1995 – 2000: A spatial econometric perspective", ZEW discussion paper / Center for European Economic Research.
11. Fodiyé Bakary DOUCOURE, 2015. Introduction à l'économétrie, cours et exercices corrigés + applications économétriques logiciels : Eviews – Stata – SPSS. 6^{ème} édition. Dakar : ARIMA.
12. Fodiyé Bakary DOUCOURE, 2015. Méthodes économétriques cours et exercices résolus avec les logiciels Eviews et Stata. Edition ; Tome 1. Dakar : ARIMA.
13. Fodiyé Bakary DOUCOURE, 2016. Méthodes économétriques avec utilisation du logiciel SATAT [cours diaporama]. Bamako : Université des Sciences sociales et de Gestion de Bamako.
14. Georgescu-Roegen, N. (1971). The entropy law and the economic process. Cambridge, Masse, : Harvard University Press.
15. Granger C. W. J, 1981. "Some properties of time series data and their use in econometric model specification", Journal of econometrics, Vol. 16.
16. Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1996). The inverted-U: what does it mean?. Environment and Development Economics, 1(1), 119-122.
17. Grossman, G.M., & Krueger, AB (1995). Economie growth and the environment. Quarterly.
18. James B. Ang, 2008. Economic development, pollutant emissions and energy consumption in Malaysia. 6 May 2007 Journal of Policy Modeling. online at www.sciencedirect.com
19. Johansen S, 1988. "Statistical analysis of cointegration vectors", Journal of Economics Dynamic and Control, vol. 12.
20. Johansen S, 1991. "Estimation and hypothesis testing of cointegration vectors in Gaussian vector autoregressive models", Econometrica, Vol. 59.
21. Johansen S, 1992. "Determination of the cointegration rank in presence of linear trend", Oxford Bulletin of Economics and Statistics, Vol. 54.
22. Johansen S, 1995. "Likelihood-based inferences in cointegration vector autoregression models", Advanced texts in Econometrics, Oxford et New York, Oxford University Press, 267 p.
23. Johansen S. Juselius K, 1992. "Some structural hypotheses in a multivariate cointegration analysis of purchasing power parity and uncovered interest parity for the UK", Journal of Econometrics, vol. 53.
24. Jonas Kibala Kuma, 2018. Économétrie Appliquée : Recueil des cas pratiques sur EViews et Stata. Licence.Congo-Kinshasa. <cel-01771070>

25. Jonas Kibala Kuma, 2018. Le Modèle VAR Structurel : Eléments de théorie et pratiques sur logiciels. Master. Congo-Kinshasa. cel-01771221.
26. Klodji Thomas Koffi, 2014. Analyse de cointégration longitudinale de l'impact de la croissance de la population sur les émissions de dioxyde de carbone [en ligne]. Mémoire de maîtrise en économie : Université de Sherbrooke. Disponible sur https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/5937/Koffi_Klodji_Thomas_MScA_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y
27. Ministère de L'Economie et des Finances, 2015. Cadre Stratégique pour la Relance Economique et le Développement Durable 2016-2018 Cellule Technique du Cadre Stratégique de Lutte contre la Pauvreté – CT-CSLP
28. Ministère de L'Economie et des Finances, 2016. Cadre Stratégique pour la Relance Economique et le Développement Durable du Mali.
29. Ministère de l'Environnement de l'Assainissement et du Développement Durable (MEADD), 2018. Rapport troisième communication du Mali à la convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. [en ligne]. Changements climatiques. Année, 121 pages. Disponible sur : http://aedd.gouv.ml/wp-content/uploads/2018/08/RAPPORT_FINAL_TCN_09_01_18.pdf
30. Ministère de l'Environnement et de l'Assainissement, 2019. Politique Nationale de Protection de l'Environnement.
31. Ministère de la Solidarité, de l'Action Humanitaire et de la Reconstruction du Nord, 2014. Rapport National sur le Développement Humain édition 2014. 176 pages.
32. Nations Unies, 2015. Rapport sur le développement durable en Afrique Cinquième édition. [en ligne]. Environnement. 2015, 290 pages. Disponible sur : https://www.uneca.org/sites/default/files/PublicationFiles/sdra_5_fullreport_french-fin.pdf
33. Stearn, D. L, Auld, T., Common, M., & Sanyal, K. K. (1998). Is there an Environmental Kuznets Curve for Sulfur? - An analysis of Bias in Environmental Kuznets Curve Estimation, World Congress and Environmental Economics. Venewia, Italy.
34. Stem, D.I, Common, M.S., Barbier, E.B, 1996. Economie growth and environment degradation. The environment Kuznets Curve and sustainable development World Development,
35. Stem, D.I, Common, M.S., Barbier, E.B, 1996. Economie growth and environment degradation. The environment Kuznets Curve and sustainable development World Development.
36. World Bank, 1992. World Development Report 1992 : Development and the Environment. Washington, DC the World Bank.