



Munich Personal RePEc Archive

Digitalization, green taxation and energy capacities: an analysis of Environmental Quality in North Africa using the CS-ARDL approach

Amayed, Yasser

Institut Supérieur d'Administration des Entreprises Département
d'Économie et Méthodes Quantitatives Université de Gafsa Tunisie

26 March 2025

Online at <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/124127/>
MPRA Paper No. 124127, posted 29 Mar 2025 14:48 UTC

Digitalisation, Fiscalité Verte et Capacités Énergétiques : Une Analyse de la Qualité Environnementale en Afrique du Nord à l'Aide de l'Approche CS-ARDL

Yasser AMAYED

Université de Gafsa

Institut Supérieur d'Administration des Entreprises
Département d'Économie et Méthodes Quantitatives
Rue Houssine Ben Kaddour, Sidi Ahmed Zarroug, 2112 Gafsa, Tunisie

yaser.amayed70@gmail.com

Résumé : Cet article examine l'impact de la digitalisation, des recettes fiscales environnementales et des capacités énergétiques sur la qualité environnementale en Afrique du Nord, en se concentrant sur l'Égypte, le Maroc et la Tunisie. En s'appuyant sur la courbe environnementale de Kuznets, l'étude intègre l'essor des technologies de l'information et de la communication (TIC) et la fiscalité verte pour analyser leur influence sur la relation entre croissance économique et dégradation environnementale.

À l'aide d'un modèle CS-ARDL, l'analyse distingue les effets à court et long terme. Les résultats montrent qu'une hausse du PIB entraîne d'abord une augmentation des émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, au-delà d'un seuil critique, la fiscalité environnementale et l'amélioration des infrastructures énergétiques et numériques réduisent progressivement ces émissions.

Ces résultats soulignent que la transformation numérique, combinée à une fiscalité verte efficace et aux technologies émergentes (IA, IoT, réalité augmentée et virtuelle), constitue un levier stratégique pour atténuer l'impact environnemental d'une croissance soutenue en Afrique du Nord.

Mots-clés : Digitalisation, fiscalité verte, capacités énergétiques, qualité environnementale, Afrique du Nord, CS-ARDL

Codes JEL : O33, Q41, E31, L86, C23

Abstract: The present article examines the impact of digitization, environmental tax revenues and energy capacity on environmental quality in North Africa, focusing on Egypt, Morocco and Tunisia. Utilising the Kuznets environmental curve, the study integrates the rise of information and communication technologies (ICT) and green taxation to analyse their influence on the relationship between economic growth and environmental degradation.

Utilising a CS-ARDL model, the analysis differentiates between short- and long-term effects. The study's findings indicate that an augmentation in Gross Domestic Product (GDP) is associated with an initial escalation in greenhouse gas emissions. However, beyond a critical threshold, the implementation of environmental taxation, coupled with the advancement of energy and digital infrastructures, leads to a gradual decline in these emissions.

The findings emphasise that digital transformation, in conjunction with effective green taxation and emerging technologies (AI, IoT, augmented and virtual reality), can serve as a strategic lever for mitigating the environmental impact of sustained growth in North Africa.

Keywords: Digitalization, green taxation, energy capacity, environmental quality, North Africa, CS-ARDL

Codes JEL : O33, Q41, E31, L86, C23

1. Introduction

L'Afrique du Nord se trouve aujourd'hui à un tournant décisif, confrontée à un paradoxe saisissant : bien que sa contribution aux émissions mondiales de gaz à effet de serre demeure relativement faible, elle est particulièrement vulnérable aux effets du changement climatique. Cette fragilité, combinée à une croissance économique soutenue, impose aux économies nord-africaines de repenser en profondeur leurs modèles de développement afin de concilier expansion économique, transition énergétique et préservation de l'environnement. Dans ce contexte, la digitalisation et la fiscalité verte émergent comme deux leviers stratégiques essentiels pour transformer les systèmes de production et de consommation, tout en améliorant la gestion des ressources naturelles.

La transformation numérique, moteur de la quatrième révolution industrielle, ouvre des perspectives inédites pour optimiser l'efficacité énergétique et réduire l'empreinte carbone. Les avancées dans des domaines tels que l'intelligence artificielle, l'Internet des objets, la réalité augmentée et la réalité virtuelle permettent désormais de développer des systèmes de production intelligents, capables d'ajuster en temps réel l'utilisation de l'énergie et de limiter les gaspillages. Ces technologies émergentes, qui redéfinissent les pratiques industrielles, sont soutenues par des investissements en TIC, dont l'impact positif sur l'inclusion numérique et la modernisation des infrastructures a été mis en évidence par Xiangling et Qamruzzaman (2024) ainsi que par Mushtaq et al. (2024).

Parallèlement, la fiscalité verte, fondée sur le principe du « pollueur-payeur » (Eurostat, 2013 ; OCDE, 2019), constitue un instrument clé pour inciter les acteurs économiques à adopter des pratiques plus durables. L'introduction de taxes sur les émissions polluantes permet d'internaliser les coûts environnementaux et d'orienter les investissements vers des technologies propres. Des études récentes, telles que celles de Domguia et al. (2024) et d'Okombi et al. (2024), soulignent que si l'effet immédiat de ces mesures peut être limité, leur impact cumulé à long terme s'avère significatif et contribue à une réduction progressive des émissions de gaz à effet de serre.

L'Accord de Paris (2015) et les Objectifs de développement durable des Nations Unies renforcent l'urgence d'adopter des politiques visant à limiter le réchauffement climatique tout en favorisant une croissance inclusive. La courbe environnementale de Kuznets, qui postule une relation en U inversé entre la croissance économique et la dégradation environnementale (Grossman et Krueger, 1991), constitue un cadre analytique pertinent pour examiner cette évolution. Toutefois, des recherches récentes (Ben Youssef et Dahmani, 2024a ; Dahmani et al., 2022a) montrent que cette relation peut être modulée par des facteurs contemporains tels que la digitalisation et la fiscalité verte, qui accélèrent l'innovation technologique et la transition vers les énergies renouvelables, réduisant ainsi l'impact environnemental de la croissance.

Les avancées technologiques liées aux industries 4.0 et 5.0, ainsi que l'essor de l'intelligence artificielle et de l'Internet des objets, offrent des outils puissants pour transformer les processus industriels et optimiser la gestion énergétique. En modernisant les systèmes de production et en améliorant l'efficacité énergétique, ces innovations permettent de réduire les coûts énergétiques et de diminuer significativement l'empreinte carbone, comme le démontrent les travaux de Ben Lahouel et al. (2022). De plus, la combinaison de mesures fiscales environnementales et d'investissements ciblés dans la digitalisation et les capacités

énergétiques constitue une voie prometteuse pour concilier croissance économique et préservation de l'environnement.

Notre étude se distingue par une approche intégrée qui examine l'impact conjoint de la digitalisation, des recettes fiscales environnementales et des capacités énergétiques sur la qualité environnementale dans les économies nord-africaines. À l'aide du modèle CS-ARDL, nous analysons les interdépendances transversales et l'hétérogénéité structurelle des données de panel issues de l'Égypte, du Maroc et de la Tunisie. Cette approche économétrique de deuxième génération permet de distinguer les effets transitoires des relations structurelles à long terme, fournissant ainsi aux décideurs des seuils critiques pour orienter la mise en place de politiques adaptées.

Le présent article est structuré comme suit. La section 2 propose une revue de la littérature qui situe notre recherche dans le contexte des études récentes sur la digitalisation, la fiscalité environnementale et la transition énergétique. La section 3 détaille le cadre théorique et la méthodologie employée, en présentant la spécification du modèle CS-ARDL et les sources de données utilisées. La section 4 expose les résultats empiriques, en distinguant les effets à court et à long terme et en les confrontant aux conclusions des travaux existants. Enfin, la section 5 formule des recommandations politiques concrètes et adaptées aux réalités économiques et institutionnelles de l'Égypte, du Maroc et de la Tunisie, afin de favoriser une transition énergétique et numérique efficace et durable.

2. Revue de la littérature

La littérature récente sur la convergence entre digitalisation, fiscalité verte et transition énergétique offre un panorama riche et complexe, particulièrement dans le contexte de la région MENA. Dès les premiers travaux de Kraft et Kraft (1978), l'énergie était identifiée comme un moteur essentiel de la croissance économique, base sur laquelle s'appuient aujourd'hui des recherches intégrant les nouvelles dimensions technologiques et environnementales. L'essor des technologies de l'information et de la communication (TIC) a ainsi conduit de nombreux chercheurs à réexaminer les processus de développement en intégrant des variables telles que l'investissement en TIC, l'inclusion financière numérique et les mesures fiscales environnementales.

Xiangling et Qamruzzaman (2024) examinent le rôle déterminant de l'investissement dans les TIC et de l'inclusion financière numérique, associés aux politiques fiscales et environnementales, dans la promotion d'un développement énergétique durable au sein de la région MENA. Leur approche, basée sur des modèles à effets dynamiques communs, démontre que ces leviers contribuent positivement à l'adoption des énergies renouvelables et à la réduction de l'empreinte carbone. De même, Mushtaq et al. (2024) étudient l'impact de la digitalisation sur l'efficacité énergétique dans les pays en développement en utilisant une méthode en deux étapes du Generalized Method of Moments, et montrent que l'amélioration des infrastructures numériques favorise la réduction de l'intensité énergétique, bien que les effets varient selon le contexte institutionnel.

Les études qui explorent la relation non linéaire entre TIC et émissions environnementales apportent une perspective supplémentaire à ce débat. Ben Lahouel et al. (2022) appliquent le modèle de Panel Smooth Transition Regression pour mettre en évidence un seuil critique de pénétration des TIC, au-delà duquel l'augmentation de leur utilisation réduit significativement les émissions de CO₂, illustrant ainsi le potentiel de ces technologies à inverser les tendances de dégradation environnementale. En parallèle, Elfarra et al. (2024) se concentrent sur

l'interaction entre sécurité énergétique, mix énergétique et innovations technologiques, démontrant que malgré une forte dépendance aux combustibles fossiles, les avancées technologiques permettent d'améliorer substantiellement la productivité énergétique.

Sur le plan fiscal, Domguia et al. (2024) étudient l'effet des taxes environnementales sur l'accès à des sources d'énergie plus propres dans les pays en développement. Ils soulignent que des politiques fiscales bien conçues peuvent stimuler l'adoption des énergies renouvelables. Cette analyse est complétée par Okombi et al. (2024), qui examinent l'impact des politiques de taxation environnementale sur la croissance verte inclusive, insistant sur l'importance d'un cadre institutionnel robuste pour maximiser l'efficacité de ces mesures.

Les interactions entre digitalisation, fiscalité environnementale et performance énergétique sont abordées par plusieurs travaux. Ben Azzeddine et al. (2024) fournissent une analyse approfondie du découplage entre croissance économique et émissions de gaz à effet de serre au Maroc, en utilisant des méthodes de cointégration qui révèlent des liens à long terme entre ces variables. Par ailleurs, Asli et al. (2024) ainsi que Al-Zubairi et al. (2024) démontrent que l'intégration des innovations technologiques et la mise en œuvre de réformes institutionnelles jouent un rôle important pour réduire l'intensité énergétique et améliorer l'efficacité environnementale.

L'importance des secteurs spécifiques dans cette dynamique est également mise en lumière. Routabi et Bennani (2024) étudient l'impact des stratégies de marketing numérique sur l'attractivité durable des villes intelligentes, avec un cas particulier de Casablanca, et montrent que l'utilisation ciblée des outils digitaux favorise une meilleure gestion des ressources urbaines et une réduction de l'empreinte environnementale. De son côté, Ghorfi et al. (2025) analysent le potentiel de l'intelligence artificielle pour optimiser la gestion des réseaux électriques en région MENA, révélant que l'automatisation des processus contribue à une réduction significative des coûts et des émissions.

Les recherches sur les dynamiques à long terme offrent par ailleurs des éclairages essentiels. Les travaux de Dahmani et al. (2022a, 2022b, 2023), ainsi que ceux de Dahmani et Mabrouki (2025), utilisent l'approche CS-ARDL pour explorer le lien entre digitalisation, développement financier, consommation énergétique et croissance dans les pays du MENA. Ces études démontrent que les effets des TIC et des politiques environnementales se manifestent tant à court terme qu'à long terme, et que des relations bidirectionnelles complexes existent entre ces variables. Ces résultats soulignent l'importance du capital humain, de l'innovation technologique et de la qualité de la gouvernance pour moduler les impacts de la digitalisation sur la performance environnementale. En outre, Ben Youssef et Dahmani (2024a, 2024b, 2024c) examinent le rôle conjoint des taxes environnementales et de la capacité énergétique dans le cadre de l'hypothèse de la courbe de Kuznets environnementale, en utilisant des méthodes avancées telles que le DCCMG et le CS-ARDL pour révéler que l'intensification des mesures fiscales et l'amélioration des infrastructures énergétiques contribuent à la réduction des émissions de gaz à effet de serre sur le long terme. Par ailleurs, Dada et al. (2025) adoptent une approche basée sur le modèle STIRPAT combinée à une régression par moments quantile pour analyser l'impact des TIC sur l'empreinte écologique dans les pays africains, montrant que les effets de la digitalisation varient considérablement selon la composante (abonnements fixes et mobiles versus accès à Internet).

Les questions institutionnelles et la qualité de la gouvernance occupent également une place centrale dans le débat. Enusah et al. (2024) et Okombi et al. (2024) montrent que l'efficacité des politiques environnementales dépend fortement de la qualité des institutions, du contrôle

de la corruption et de l'efficacité gouvernementale. Ils suggèrent que des réformes institutionnelles sont indispensables pour que les politiques de fiscalité verte et les investissements en TIC génèrent les retombées escomptées en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Par ailleurs, des études comme celles d'Iddrisu et al. (2024) examinent l'impact de la digitalisation sur la croissance économique en interaction avec le développement du secteur financier, soulignant l'importance de renforcer les capacités institutionnelles pour tirer pleinement parti des technologies numériques. Evans (2024) s'intéresse quant à lui aux dynamiques d'investissement dans la transition énergétique dans plusieurs pays africains, révélant que la hausse des prix du pétrole et la croissance économique influencent significativement les investissements dans les énergies renouvelables, tout en montrant que l'expansion des TIC joue un rôle positif dans ce processus.

Les analyses de Bergougui et Meziane (2025) apportent une perspective spécifique à la gestion des ressources naturelles en évaluant l'impact de la transition énergétique, de l'innovation technologique et des ressources naturelles sur la performance énergétique en Algérie. Leur étude, qui combine des approches ARDL et DARDL avec des validations par méthodes d'apprentissage automatique, démontre que l'innovation technologique et l'urbanisation ont des effets significatifs sur la capacité de charge des systèmes énergétiques, tandis que les ressources naturelles, si elles ne sont pas gérées efficacement, peuvent entraver la transition vers une production plus propre.

Enfin, Arbia et al. (2024) analysent le rôle des investissements directs étrangers et de la diffusion des TIC dans la croissance économique des pays nord-africains, mettant en lumière la manière dont ces facteurs interagissent pour favoriser une dynamique de croissance respectueuse de l'environnement. De même, Sarabdeen et al. (2024) explorent l'impact de la transformation numérique sur la transition vers une économie à faible émission de carbone, soulignant l'importance d'une coordination entre les politiques énergétiques et numériques pour atteindre les objectifs de développement durable.

L'ensemble de ces contributions offre ainsi une vue d'ensemble approfondie et nuancée des mécanismes par lesquels la digitalisation, les politiques fiscales environnementales et la transition énergétique interagissent pour influencer la performance environnementale et la croissance économique. Ces études, qui recourent à des méthodes économétriques avancées telles que le CS-ARDL, le DCCEMG, le Super-SBM, le PSTR et les approches basées sur le cadre STIRPAT, illustrent la nécessité d'une approche intégrée prenant en compte les dimensions technologiques, institutionnelles et économiques pour promouvoir un développement durable dans la région MENA. Les études multiples, incluant celles de Ben Lahouel et al. (2022), Ben Azzeddine et al. (2024), Domguia et al. (2024), Elfarra et al. (2024), Mushtaq et al. (2024), Okombi et al. (2024), ainsi que celles de Dahmani et Ben Youssef (2023), Abu Alfoul et al. (2024), Arbia et Sobhi (2024), Sarabdeen et al. (2024), Bala et Khatoon (2024), Ben Youssef et al. (2024a, 2024b), Dahmani (2024), Dahmani et al. (2022a, 2022b, 2023), Fambeu et Yomi (2024), Iddrisu et al. (2024), Evans (2024), Shouwu et al. (2024), Routabi et Bennani (2024), Bergougui et al. (2025), Dada et al. (2025), Ghorfi et al. (2025), Leal-Arcas (2025) et Mounkaila Gourouza et al. (2025) témoignent de la diversité des approches et des résultats dans ce domaine. Ces études fournissent une base empirique solide pour comprendre les mécanismes complexes à l'œuvre dans la transition numérique et énergétique. Elles constituent également un socle théorique indispensable pour l'élaboration de politiques visant à concilier développement économique et durabilité environnementale en Afrique du Nord.

3. Cadre méthodologique et stratégie d'analyse

3.1. Méthode d'analyse économétrique

3.1.1. Cadre théorique et spécification du modèle

La présente étude s'appuie sur la théorie de la courbe environnementale de Kuznets (CEK) formulée par Grossman et Krueger (1991) afin d'examiner la relation entre la croissance économique et la qualité environnementale dans les pays d'Afrique du Nord. Selon ce cadre théorique, l'accroissement initial du produit intérieur brut (PIB) engendre une dégradation de l'environnement, notamment par l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES), avant qu'un seuil de revenu par habitant ne permette d'inverser cette tendance. Au-delà de ce seuil, la croissance économique favorise alors l'amélioration de la qualité environnementale.

Pour approfondir cette analyse, le modèle proposé intègre, en complément du PIB et de son effet quadratique, des indicateurs relatifs aux politiques fiscales environnementales ainsi qu'aux capacités énergétiques et technologiques. Cette extension permet d'évaluer l'influence de la digitalisation et des énergies renouvelables sur les émissions de GES. Dans ce contexte, le modèle économétrique est spécifié de manière non linéaire, de sorte qu'il inclut à la fois le PIB par habitant (GDP_CAP_{it}) et son carré ($GDP_CAP_{it}^2$) pour saisir l'effet de seuil, ainsi que des variables représentant les recettes fiscales environnementales (ENV_TR_{it}), l'indice de capacité énergétique (ENR_PCI_{it}) et celui de la capacité en TIC (ICT_PCI_{it}).

La forme générale de la régression s'exprime ainsi :

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta X'_{it} + \varepsilon_{it}$$

où Y_{it} désigne les émissions de GES par habitant pour le pays i à l'année t , β_0 représente la constante, β le vecteur des coefficients associés aux variables explicatives X'_{it} et ε_{it} le terme d'erreur. Pour faciliter l'estimation, la fonction est linéarisée par une transformation logarithmique, conduisant à l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \ln(GHG_CAP_{it}) = & \beta_0 + \beta_1 \ln(GDP_CAP_{it}) + \beta_2 \ln(GDP_CAP_{it}^2) + \beta_3 \ln(ENV_TR_{it}) \\ & + \beta_4 \ln(ENR_PCI_{it}) + \beta_5 \ln(ICT_PCI_{it}) + \varepsilon_{it} \end{aligned}$$

Dans cette spécification, l'interprétation des variables logarithmiques est la suivante : $\ln(GHG_CAP_{it})$ représente le logarithme des émissions de GES par habitant, $\ln(GDP_CAP_{it})$ celui du PIB par habitant et $\ln(GDP_CAP_{it}^2)$ permet de saisir la relation non linéaire postulat par la CEK. Par ailleurs, $\ln(ENV_TR_{it})$ traduit l'intensité des recettes fiscales environnementales, tandis que $\ln(ENR_PCI_{it})$ et $\ln(ICT_PCI_{it})$ mesurent respectivement la capacité énergétique et la diffusion des technologies de l'information et de la communication.

Les coefficients β_1 et β_2 sont attendus, selon la logique de la CEK, à présenter des signes contraires, le premier étant positif (reflétant une augmentation initiale des émissions avec la croissance économique) et le second négatif (indiquant qu'au-delà d'un seuil, la hausse du revenu s'accompagne d'une réduction des émissions). De même, le coefficient β_3 devrait être négatif, témoignant de l'effet réducteur des politiques fiscales environnementales, tandis que

β_4 et β_5 sont supposés positifs, traduisant que, sur le long terme, l'amélioration de la capacité énergétique et le déploiement des TIC contribuent à l'optimisation de la gestion environnementale.

Ce cadre théorique, enrichi par l'intégration de nouvelles dimensions liées à la digitalisation et aux politiques fiscales, constitue ainsi une base analytique robuste pour évaluer l'impact conjoint de ces facteurs sur la qualité environnementale dans une région caractérisée par une grande hétérogénéité économique et structurelle.

3.1.2. Sources et présentation des données

L'analyse empirique s'appuie sur un ensemble de données couvrant la période 2000-2021, recueillies auprès de sources reconnues pour leur fiabilité, telles que l'Organisation de coopération et de développement économiques (OECD, 2025) et la Conférence des Nations unies sur le commerce et le développement (UNCTAD, 2025). Les pays étudiés – en l'occurrence l'Égypte, le Maroc et la Tunisie – ont été retenus en raison de leurs contextes économiques et environnementaux hétérogènes, ce qui permet de comparer finement des systèmes aux structures fiscales et aux performances environnementales différentes. Le choix de ces pays repose sur la disponibilité et la comparabilité des indicateurs essentiels à l'analyse.

Les variables sélectionnées permettent de mesurer de manière approfondie l'impact de la digitalisation, des politiques fiscales et des infrastructures énergétiques sur la qualité environnementale. Ainsi, l'étude prend en considération les émissions de gaz à effet de serre par habitant, le produit intérieur brut par habitant, ainsi que les recettes fiscales liées à l'environnement. Par ailleurs, des indices mesurant la capacité énergétique et le développement des technologies de l'information et de la communication sont également intégrés à l'analyse. Ces indicateurs sont particulièrement pertinents pour appréhender les effets conjoints de la modernisation numérique et des politiques incitatives sur la durabilité environnementale dans un contexte nord-africain.

Les données relatives aux émissions de GES, exprimées en tonnes d'équivalent CO₂ par habitant, et au PIB par habitant, mesurées en dollars constants de 2015, proviennent de l'OCDE. Quant aux recettes fiscales environnementales, elles proviennent également de cette institution et sont exprimées en pourcentage du PIB, ce qui permet d'apprécier leur importance relative dans les économies concernées. Les indices de capacité énergétique et en TIC, quant à eux, sont extraits des bases de données de l'UNCTAD et reflètent, respectivement, l'aptitude d'un pays à gérer ses ressources énergétiques de manière durable et à déployer des infrastructures numériques efficaces.

La description statistique des variables utilisées, présentée dans le Tableau 1, offre un panorama détaillé des disparités observées entre les pays étudiés. Par exemple, le PIB par habitant montre une large variabilité, témoignant des différences de niveau de vie et de développement économique, alors que les valeurs des émissions de GES mettent en lumière des profils industriels distincts. Ces indicateurs statistiques, qui incluent les moyennes, écarts-types, ainsi que les valeurs minimales et maximales, permettent de contextualiser l'analyse empirique et de justifier le recours à des techniques économétriques adaptées à des données hétérogènes. En se référant notamment au Tableau 1, il est possible d'observer que la variabilité de ces indicateurs reflète bien la diversité des environnements économiques et environnementaux, fournissant ainsi un socle solide pour l'analyse des interactions entre digitalisation, politiques fiscales et transition énergétique dans la région.

Tableau 1 : Définitions des variables et statistiques descriptives

Variable	GHG_CAP	GDP_CAP	ENV_TR	ENR_PCI	ICT_PCI
Définition	Émissions de GES par habitant (tonnes d'équivalent CO ₂)	Produit intérieur brut par habitant (en dollars constants de 2015)	Recettes fiscales liées à l'environnement (% du PIB)	Indice de capacité énergétique	Indice de capacité en TIC
Source	OECD	OECD	OECD	UNCTAD	UNCTAD
Observations	66	66	66	66	66
Moyenne	3,20	8661,23	1,10	55,58	32,76
Écart-type	0,48	2129,62	0,64	3,39	12,07
Minimum	2,16	4500,92	0,15	46,33	11,21
Maximum	4,15	12596,73	2,30	62,73	55,12

3.1.3. Présentation et justification des modèles économétriques utilisés

Pour examiner l'impact de la digitalisation, des politiques fiscales et de la capacité des ressources énergétiques sur la qualité environnementale dans trois pays d'Afrique du Nord – à savoir l'Égypte, le Maroc et la Tunisie – sur la période 2000-2021, notre étude s'appuie sur le modèle CS-ARDL (Cross-Sectionally Augmented Autoregressive Distributed Lag). Cette approche est particulièrement adaptée aux données de panel présentant de fortes interdépendances transversales et une hétérogénéité structurelle marquée, comme le montre le Tableau 1 qui souligne les disparités importantes en termes de moyennes et de variabilité des indicateurs économiques et environnementaux. Les travaux de Chudik et al. (2016, 2017) et de Pesaran (2015, 2021) insistent quant à eux sur la nécessité de corriger la dépendance transversale pour obtenir des estimations robustes dans un contexte régional caractérisé par des échanges économiques intenses et des chocs communs.

Le modèle CS-ARDL se distingue par sa flexibilité à intégrer simultanément des variables intégrées d'ordre zéro et d'ordre un, ce qui s'avère primordial lorsque les séries utilisées – telles que le GHG_CAP (mesurant les émissions de gaz à effet de serre par habitant) – présentent des dynamiques temporelles hétérogènes. Cette propriété permet ainsi de distinguer les effets à court terme, traduisant les réponses immédiates aux ajustements de politiques, des relations structurelles à long terme, qui reflètent l'impact durable des politiques de transition énergétique et de digitalisation.

De plus, le CS-ARDL se montre particulièrement robuste dans le cas de petits échantillons, comme c'est le cas dans notre étude qui porte sur trois pays. L'incorporation des moyennes croisées dans l'estimation permet de corriger efficacement la dépendance transversale, un phénomène fréquemment observé dans la région nord-africaine en raison des interconnexions économiques et des chocs partagés.

La spécification du modèle CS-ARDL utilisé dans cette analyse s'exprime comme suit :

$$\ln(\text{GHG_CAP}_{it}) = \alpha_i + \sum_{j=1}^p \beta_{ij} (\ln(\text{GHG_CAP}_{it-j}) - \overline{\ln(\text{GHG_CAP}_{t-j})}) + \sum_{k=1}^q \gamma_{ik} (X_{kit} - \overline{X_{kt}}) + \delta D_t + \mu_i + \varepsilon_{it}$$

où les effets fixes propres à chaque pays sont désignés par α_i , et les coefficients représentant les effets retardés de la variable dépendante et ceux des variables explicatives par β_{ij} et γ_{ik} , respectivement. Les moyennes croisées, notées $\overline{\ln(\text{GHG_CAP}_{t-j})}$ et la moyenne croisée $\overline{X_{kt}}$, permettent de capter les interactions entre les pays et d'isoler l'influence des politiques environnementales coordonnées. Le terme δD_t intègre quant à lui les effets fixes temporels, reflétant les chocs globaux communs à l'ensemble du panel, tandis que μ_i et ε_{it} représentent respectivement les spécificités individuelles et le terme d'erreur aléatoire.

En combinant la capacité d'intégrer des variables d'ordres d'intégration différents et de corriger les interdépendances régionales, le modèle CS-ARDL se révèle particulièrement pertinent pour analyser les effets différés et durables des politiques de digitalisation et de transition énergétique sur la qualité environnementale. Ce cadre analytique, étayé par les travaux de Chudik et al. (2016) et Pesaran (2015, 2021), offre ainsi une base rigoureuse pour formuler des recommandations politiques adaptées aux spécificités des économies nord-africaines.

3.2. Méthodologie d'estimation

3.2.1. Test de dépendance croisée

L'analyse des interactions entre les politiques environnementales (telles que les taxes, l'adoption des énergies renouvelables et le développement technologique) et la qualité environnementale en Afrique du Nord requiert la prise en compte des interdépendances économiques et structurelles entre les pays étudiés, à savoir l'Égypte, le Maroc et la Tunisie. La notion de dépendance croisée, telle que définie par Baltagi (2015), correspond à la corrélation entre les résidus issus des différentes unités d'un panel et peut résulter de chocs économiques communs ou de caractéristiques structurelles partagées. Il est donc essentiel de mesurer et d'intégrer cette dimension pour éviter que l'omission de ces corrélations n'entraîne des biais dans les estimations économétriques, susceptibles de conduire à une surestimation ou à une sous-estimation de l'impact de certaines variables sur la qualité environnementale.

Afin d'identifier et de quantifier la dépendance croisée, nous avons appliqué un test de dépendance croisée aux résidus des variables principales de cette étude. Ce test permet d'évaluer si les erreurs non observées présentent une corrélation significative, ce qui indiquerait l'existence d'interactions économiques ou de chocs communs affectant simultanément plusieurs pays. Les résultats, présentés dans le Tableau 2, montrent que toutes les variables clés – à savoir le logarithme des émissions de gaz à effet de serre par habitant (LnGHG_CAP), le logarithme du produit intérieur brut par habitant (LnGDP_CAP), le logarithme du PIB au carré (LnGDP2_CAP), le logarithme des recettes fiscales liées à l'environnement (LnRF_ENV), le logarithme de l'indice de capacité énergétique (LnIC_ENR) et le logarithme de l'indice de capacité en TIC (LnIC_TIC) – présentent une corrélation statistiquement significative au niveau de 1 %. Ces résultats suggèrent que les chocs économiques et les dynamiques politiques ou technologiques affectant un pays exercent un impact direct sur les autres, ce qui peut s'expliquer par des échanges commerciaux, des partenariats technologiques ou des politiques environnementales coordonnées au niveau régional, conformément aux recommandations des organisations internationales.

Ces constats justifient l'utilisation de modèles économétriques capables de corriger la dépendance croisée, comme le modèle CS-ARDL que nous avons retenu pour cette étude. Ce modèle intègre simultanément les effets à court terme et les relations structurelles à long terme ainsi que les interactions entre les pays, ce qui permet d'appréhender avec précision les dynamiques complexes liant la croissance économique, la fiscalité environnementale et les investissements dans les énergies renouvelables. Les résultats du Tableau 2 soulignent ainsi la nécessité d'adopter une approche régionale pour l'analyse des politiques environnementales et fiscales en Afrique du Nord, dans l'optique d'une coordination accrue qui favoriserait une amélioration collective de la qualité environnementale.

Tableau 2 : Résultats de l'analyse de la dépendance croisée

Variables	CD
Émissions de GES par habitant (LnGHG_CAP)	4,95***
PIB par habitant (LnGDP_CAP)	7,67***
PIB au carré par habitant (LnGDP2_CAP)	7,66***
Recettes fiscales liées à l'environnement (LnENV_TR)	3,10***
Indice de capacité énergétique (LnENR_PCI)	4,04***
Indice de capacité en TIC (LnICT_PCI)	8,05***

*Remarque : *** indique le niveau de signification statistique à 1%.*

L'intégration de la dépendance croisée dans notre analyse améliore la robustesse des estimations et souligne l'importance d'une approche régionale pour la formulation de politiques environnementales et fiscales adaptées aux spécificités des pays nord-africains.

3.2.2. Test d'hétérogénéité

Afin d'assurer la pertinence et la robustesse des estimations économétriques, il est indispensable d'évaluer l'hétérogénéité des coefficients entre les pays d'Afrique du Nord. Dans le présent contexte, l'analyse ne se contente pas d'imposer une homogénéité des relations entre variables à l'ensemble des unités du panel, mais tient compte des spécificités économiques et environnementales propres à chaque pays, en particulier l'Égypte, le Maroc et la Tunisie. Ces trois économies, bien que géographiquement proches, présentent en effet des trajectoires de développement très contrastées en ce qui concerne la mise en œuvre des politiques environnementales, l'adoption des énergies renouvelables et la gestion des émissions de gaz à effet de serre.

Les disparités en matière de stratégies politiques, la structure économique différente ainsi que le rythme d'adoption des technologies innovantes justifient un examen minutieux de l'hétérogénéité des coefficients. À titre d'illustration, l'infrastructure énergétique de l'Égypte repose encore majoritairement sur les énergies fossiles, malgré une intégration progressive des sources renouvelables, tandis que le Maroc a réalisé des avancées notables dans le déploiement de projets solaires d'envergure. Quant à la Tunisie, elle adopte une stratégie hybride, combinant des initiatives pour promouvoir les énergies renouvelables et des réformes progressives en matière de fiscalité environnementale.

Pour mesurer cette hétérogénéité, nous avons recours au test d'homogénéité de Pesaran et Yamagata (2008), qui permet de vérifier si les coefficients estimés diffèrent significativement d'un pays à l'autre en se focalisant sur les pentes des variables explicatives, telles que les recettes fiscales environnementales ou l'indice de capacité énergétique. Les résultats,

présentés dans le Tableau 3, indiquent une statistique delta de 3,239 avec une p-value de 0,001 et une statistique delta ajustée de 3,922 avec une p-value de 0,000. Ces valeurs permettent de rejeter l'hypothèse nulle d'homogénéité des coefficients, confirmant que les réactions aux politiques fiscales et énergétiques varient substantiellement d'un pays à l'autre.

Ces constats démontrent qu'une approche homogène ne serait pas adaptée pour modéliser les relations entre les variables. Ils soulignent ainsi la nécessité d'utiliser des modèles économétriques flexibles, capables de capturer les divergences structurelles et les dynamiques spécifiques à chaque économie. En effet, l'hétérogénéité constatée implique que les politiques environnementales et économiques doivent être conçues en tenant compte des particularités nationales. Par exemple, le Maroc pourrait renforcer ses politiques de fiscalité verte en capitalisant sur ses progrès dans le domaine de l'énergie solaire, tandis que l'Égypte, en raison de sa forte dépendance aux énergies fossiles, nécessiterait une réforme plus radicale de son secteur énergétique avant d'envisager une taxation environnementale plus stricte. Pour la Tunisie, un rééquilibrage entre l'encouragement des énergies renouvelables et la mise en œuvre de mesures fiscales adaptées semble être préconisé.

Tableau 3 : Résultats du test d'hétérogénéité

	Statistique Δ	P-value
Test delta	3,239	0,001
Test delta ajusté	3,922	0,000

Ces résultats confirment la nécessité d'adopter des modèles économétriques tenant compte de l'hétérogénéité, ce qui permet de mieux saisir les différences structurelles et les dynamiques propres à chaque pays d'Afrique du Nord dans l'analyse des politiques environnementales.

3.2.3. Tests de racine unitaire en panel

L'une des étapes fondamentales de l'analyse économétrique consiste à évaluer la stationnarité des séries temporelles issues du panel, car l'absence de stationnarité peut conduire à des corrélations fallacieuses et compromettre la validité des conclusions. Dans le cadre de cette recherche, les données présentent une interdépendance manifeste entre les unités du panel, ce qui justifie l'utilisation de tests de racine unitaire spécifiquement adaptés à ces caractéristiques. Ainsi, nous avons retenu le test IPS augmenté en coupe croisée (CIPS), tel que proposé par Pesaran (2007), qui permet de tenir compte de la corrélation entre les unités du panel et offre une robustesse accrue face à la dépendance transversale.

Les résultats obtenus, résumés dans le Tableau 4, montrent que la majorité des variables analysées ne sont pas stationnaires en niveau, mais deviennent stationnaires après une première différenciation, indiquant ainsi qu'elles sont intégrées d'ordre un (I(1)). Plus précisément, les séries représentant les émissions de gaz à effet de serre par habitant (LnGHG), le produit intérieur brut par habitant (LnGDP_CAP) ainsi que sa version quadratique (LnGDP2_CAP) et l'indice de capacité énergétique (LnENR_PCI) présentent un comportement non stationnaire en niveau, avant de devenir stationnaires une fois différenciées. À l'inverse, la variable correspondant aux recettes fiscales liées à l'environnement (LnENV_TR) se révèle stationnaire en niveau, ce qui suggère que ses variations sont principalement dues à des fluctuations de court terme et ne comportent pas de tendance stochastique à long terme.

Tableau 4 : Résultats des tests de racine unitaire en panel

Variables	En niveau		En différence première		Ordre
	Sans tendance	Avec tendance	Sans tendance	Avec tendance	
IPS augmenté en coupe croisée (CIPS)					
LnGHG	-2,312	-3,413**	-5,319***	-5,181***	I(1)
LnGDP_CAP	-2,305*	-1,569	-4,292***	-4,852***	I(1)
LnGDP2_CAP	-2,255*	-1,688	-4,205***	-4,775***	I(1)
LnENV_TR	-2,405**	-4,492***	-5,954***	-6,003***	I(0)
LnENR_PCI	-2,077	-2,156	-4,389***	-4,430***	I(1)
LnICT_PCI	-1,426	-1,844	-3,929***	-4,133***	I(1)

Remarque : ***, ** et * indiquent respectivement les niveaux de signification statistique à 1 %, 5 % et 10 %.

Ces résultats confirment la nécessité d'adopter une approche économétrique tenant compte de la non-stationnarité des séries temporelles, à l'exception de la variable LnENV_TR. En particulier, la non-stationnarité des autres variables justifie l'utilisation de techniques de cointégration pour explorer les relations de long terme entre les variables économiques et environnementales. Dans le contexte de cette étude, l'analyse de cointégration en panel permettra d'identifier les relations structurelles stables, même si les séries présentent des comportements non stationnaires en niveau. Elle garantira ainsi une meilleure compréhension des dynamiques sous-jacentes aux interactions entre taxes environnementales, capacité énergétique et digitalisation en Afrique du Nord. Sur la base de ces résultats, l'étape suivante consistera à procéder à des tests de cointégration afin d'identifier des relations à long terme, condition indispensable pour formuler des recommandations politiques adaptées à la complexité des interactions économiques et environnementales.

3.2.4. Analyse de la cointégration

Dans le cadre de cette analyse empirique, il est impératif d'établir l'existence de relations de long terme entre les variables économiques et environnementales retenues, notamment les taxes environnementales, l'adoption des énergies renouvelables, le produit intérieur brut par habitant et les émissions de gaz à effet de serre par habitant. Étant donné les interdépendances économiques confirmées entre les pays nord-africains et la non-stationnarité de certaines séries, l'application d'un test de cointégration apparaît comme une étape indispensable pour dégager les liens structurels durables entre ces indicateurs.

Le concept de cointégration permet de déterminer si, en dépit de fluctuations transitoires, les variables évoluent conjointement de manière stable sur le long terme. Ce principe revêt une importance particulière dans la présente étude, puisque, bien que les politiques environnementales et économiques puissent engendrer des effets immédiats diversifiés, elles tendent à produire des résultats cohérents à plus long terme. Afin de capturer ces dynamiques complexes, nous avons opté pour le test de cointégration en panel de Westerlund (2007). Cette méthode se distingue par sa capacité à prendre en compte à la fois l'hétérogénéité des coefficients entre les unités du panel et la dépendance croisée, conditions essentielles pour analyser les économies nord-africaines qui partagent certaines caractéristiques structurelles, tout en affichant des spécificités nationales marquées.

Le test de Westerlund (2007) repose sur l'estimation d'une relation de long terme entre les variables en vérifiant si les erreurs résiduelles du modèle suivent un processus stationnaire. En d'autres termes, la stationnarité des résidus indique que les variables se déplacent ensemble sur le long terme, ce qui confirme la présence d'une cointégration. Quatre statistiques – notées

$G\tau$, $G\alpha$, $P\tau$ et $P\alpha$ – ont été utilisées afin de déterminer si la relation de cointégration est commune à l'ensemble du panel ou propre à chaque pays.

Les résultats, présentés dans le Tableau 5, indiquent une significativité élevée pour chacune des statistiques, avec des valeurs p inférieures à 0,01, ce qui permet de rejeter l'hypothèse nulle d'absence de cointégration. Ces résultats démontrent que, malgré les variations à court terme des émissions, du PIB, des taxes environnementales et des énergies renouvelables, les variables convergent vers une dynamique commune à long terme.

Tableau 5 : Résultats des tests de cointégration

Statistique	Valeur	Z-value	P-value
$G\tau$	-4,801	-5,229	0,000
$G\alpha$	-15,466	-2,123	0,017
$P\tau$	-9,096	-5,200	0,000
$P\alpha$	-16,483	-3,350	0,000

Ces résultats indiquent que les politiques fiscales environnementales, l'adoption des énergies renouvelables et les fluctuations du PIB exercent un impact durable sur la qualité environnementale dans les pays étudiés. L'existence d'une cointégration suggère que les efforts pour augmenter les revenus fiscaux liés à l'environnement et promouvoir les énergies renouvelables s'accompagnent d'une réduction à long terme des émissions de gaz à effet de serre, en dépit des variations conjoncturelles. En outre, la cointégration démontre que les fluctuations à court terme, telles que les chocs économiques ou les crises énergétiques, ne compromettent pas nécessairement les objectifs de développement durable. Ces constats impliquent que les politiques environnementales doivent être conçues pour résister aux aléas à court terme tout en maintenant un cap constant vers une transition énergétique durable. Ils justifient ainsi l'adoption d'une approche cohérente et à long terme par les décideurs politiques en Afrique du Nord.

4. Résultats et discussions

4.1. Estimation de la relation à long et à court terme : modèle CD-ARDL

L'analyse des interactions entre les politiques économiques, fiscales et environnementales dans les pays d'Afrique du Nord s'appuie sur l'estimation d'un modèle CD-ARDL, méthode particulièrement appropriée pour capturer les dynamiques à la fois transitoires et structurelles dans un panel caractérisé par des interdépendances fortes. Cette approche permet d'intégrer simultanément des variables de différents ordres d'intégration, conformément aux recommandations de Pesaran (2015) et aux approches avancées adoptées dans plusieurs études récentes (Dahmani et al., 2022a ; Ben Youssef et Dahmani, 2024a).

4.1.1. Résultats à court terme

Les estimations à court terme, présentées dans le Tableau 6, révèlent une dynamique d'ajustement rapide vers l'équilibre de long terme. Le coefficient de correction d'erreur (ECT) est évalué à -0,813, ce qui indique qu'environ 81 % des écarts par rapport à l'équilibre de long terme sont corrigés d'une année sur l'autre. Ce résultat est en accord avec les constatations de Dahmani et Mabrouki (2025), qui ont observé une correction rapide dans les économies nord-africaines lors d'ajustements structurels. Par ailleurs, les coefficients relatifs au produit intérieur brut par habitant ($\ln GDP_CAP$) et à son terme quadratique

(LnGDP2_CAP) corroborent la courbe environnementale de Kuznets telle que postulée par Grossman et Krueger (1991). À court terme, le coefficient de LnGDP_CAP est estimé à 103,896, tandis que celui de LnGDP2_CAP est de -5,695, ce qui confirme qu'une croissance économique initiale se traduit par une augmentation des émissions de gaz à effet de serre, avant qu'une inflexion ne survienne.

Les résultats concernant les variables fiscales et technologiques montrent également des effets contrastés. Le coefficient de LnENV_TR, bien que modérément significatif (valeur de -0,095, $p=0,083$), suggère un impact négatif sur les émissions à court terme, qui s'inscrit dans la lignée des études de Domguia et al. (2024) sur l'efficacité des taxes environnementales. En revanche, les indices de capacité énergétique (LnENR_PCI) et de capacité en TIC (LnICT_PCI) présentent des coefficients positifs de 0,819 et 0,306, respectivement, indiquant que ces deux dimensions, bien qu'elles puissent favoriser l'amélioration des infrastructures à long terme, n'offrent pas immédiatement des effets réducteurs sur les émissions de GES. Ces résultats à court terme sont similaires à ceux de Ben Lahouel et al. (2022) et Fambeu et Yomi (2024), qui ont montré que l'impact des TIC sur l'environnement peut varier en fonction du niveau de pénétration technologique et de la phase de développement.

Tableau 6 : Estimations des données de panel CD-ARDL : résultats à court et à long terme

	Coefficient	Écart-type	Statistique Z	P-value
Résultats à court terme				
ECT (-1)	-0,813	0,192	-9,43	0,000
LnGDP_CAP	103,896	24,729	4,20	0,000
LnGDP2_CAP	-5,695	1,306	-4,36	0,000
LnENV_TR	-0,095	0,057	-1,67	0,083
LnENR_PCI	0,819	0,984	1,85	0,064
LnICT_PCI	0,306	0,093	3,28	0,001
Résultats à long terme				
LnGDP_CAP	60,268	16,750	3,60	0,000
LnGDP2_CAP	-3,300	0,893	-3,69	0,000
LnENV_TR	-0,048	0,025	-2,22	0,026
LnENR_PCI	0,921	0,426	2,16	0,031
LnICT_PCI	0,179	0,070	2,58	0,010
Statistique CD	-1,18			0,238

4.1.2. Résultats à long terme

Les estimations à long terme confirment l'existence de relations structurelles stables entre les variables économiques et environnementales. Le coefficient positif de LnGDP_CAP, évalué à 60,268, associé au coefficient négatif de LnGDP2_CAP (-3,300), réaffirme la validité de la courbe environnementale de Kuznets dans la région, une constatation également soutenue par les travaux de Ben Azzeddine et al. (2024) sur le découplage entre croissance et émissions au Maroc. Ces résultats indiquent que, sur le long terme, l'augmentation du revenu par habitant entraîne d'abord une hausse des émissions, avant que des politiques de développement durable, notamment les taxes environnementales, n'atténuent progressivement cet effet.

Le coefficient de LnENV_TR à long terme, égal à -0,048, démontre que les politiques fiscales environnementales produisent un effet réducteur durable sur les émissions de gaz à effet de serre, ce qui corrobore les résultats empiriques d'Enusah et al. (2024) et d'Okombi et al. (2024) sur l'efficacité des mesures fiscales dans la promotion d'une transition énergétique. Par ailleurs, les indices de capacité énergétique et des TIC, avec des coefficients respectifs de 0,921 et 0,179, confirment que l'amélioration des infrastructures, tant énergétiques que

numériques, contribue de manière significative à la réduction des émissions sur le long terme. Ces résultats sont en accord avec les conclusions de Ghorfi et al. (2025) ainsi que celles de Dahmani et al. (2023), qui soulignent que, bien que les effets immédiats des investissements technologiques puissent être moins marqués, leur impact s'amplifie avec le temps.

L'ensemble des résultats obtenus à travers le modèle CD-ARDL offre ainsi une illustration claire des dynamiques à la fois transitoires et structurelles dans les économies d'Afrique du Nord. Ces estimations, qui confirment notamment l'existence d'une relation stable à long terme entre la croissance, les politiques fiscales environnementales et la transition énergétique, rejoignent les constats de la littérature, notamment ceux rapportés par Ben Youssef et Dahmani (2024a, 2024b) et Dahmani et al. (2022a, 2022b, 2023). Ces travaux démontrent que, malgré des fluctuations à court terme, les politiques de digitalisation et de fiscalité verte tendent à favoriser une amélioration progressive de la qualité environnementale. La capacité d'ajustement rapide observée à court terme met également en évidence la réactivité des économies nord-africaines face aux chocs économiques et environnementaux, un résultat en phase avec les études de Ben Lahouel et al. (2022) et de Mushtaq et al. (2024).

Ces résultats fournissent ainsi une base empirique robuste pour étayer des recommandations politiques qui viseront à renforcer l'intégration des TIC et des mesures fiscales afin de promouvoir une transition énergétique durable dans la région MENA.

4.1.3. Discussion des résultats et implications politiques

Les résultats issus du modèle CD-ARDL permettent d'identifier des mécanismes sous-jacents qui illustrent la manière dont les politiques fiscales, la digitalisation et les capacités énergétiques interagissent pour influencer la qualité environnementale dans les économies nord-africaines. D'une part, les effets observés confirment la présence d'une relation non linéaire entre croissance économique et dégradation environnementale, en accord avec la théorie de la courbe environnementale de Kuznets. Cette relation suggère qu'une phase initiale de développement économique se caractérise par une intensification des émissions de gaz à effet de serre, avant que des politiques structurantes ne permettent, à terme, d'inverser cette tendance. Les travaux de Dahmani et al. (2022a) et Ben Azzeddine et al. (2024) de illustrent ce phénomène dans d'autres contextes en développement, ce qui renforce la validité de nos constatations pour la région.

Les effets différés des mesures fiscales environnementales apparaissent également comme déterminants. Bien que l'impact immédiat des taxes environnementales ne soit que modéré, leur contribution à la réduction des émissions se manifeste de manière significative sur le long terme. Ce décalage temporel met en évidence la nécessité d'une mise en œuvre progressive et continue de ces instruments, ce qui rejoint les constats de Domguia et al. (2024) et d'Okombi et al. (2024), qui insistent sur l'importance d'un cadre fiscal stable et évolutif pour engendrer des changements durables.

Les résultats indiquent en outre que l'amélioration des infrastructures énergétiques et numériques est associée à des retombées positives sur la qualité environnementale. Les coefficients positifs liés aux indices de capacité énergétique et de digitalisation suggèrent que, sur le long terme, les investissements dans ces secteurs contribuent à une gestion plus efficiente des ressources et favorisent la transition vers des systèmes de production moins dépendants des énergies fossiles. Ces observations corroborent les analyses de Dahmani et al. (2023) ainsi que celles de Ghorfi et al. (2025), qui démontrent que le renforcement des réseaux énergétiques et l'adoption de technologies numériques avancées améliorent substantiellement l'efficacité énergétique et réduisent l'empreinte carbone.

Enfin, la forte interdépendance entre les économies de la région, révélée par les tests de dépendance transversale, indique que les politiques environnementales et fiscales ne peuvent être conçues de manière isolée. L'interaction des chocs et des réformes dans un pays influence directement les performances des autres économies du panel. Cette dynamique régionale suggère que des initiatives transfrontalières, telles que des projets communs dans le domaine des énergies renouvelables ou des accords sur la fiscalité verte, pourraient générer des synergies importantes. Les travaux d'Ullah et al. (2024) appuient cette perspective en soulignant l'intérêt d'une coordination politique renforcée pour optimiser les retombées en matière de durabilité environnementale.

Ces éléments offrent ainsi des pistes de réflexion sur les enjeux stratégiques auxquels les décideurs des pays d'Afrique du Nord sont confrontés, en soulignant la nécessité d'adopter des réformes structurelles à long terme, de renforcer les investissements dans les infrastructures numériques et énergétiques et de promouvoir une coordination régionale pour maximiser l'efficacité des politiques de transition environnementale.

4.2. Implications politiques et recommandations

Les résultats empiriques obtenus offrent un éclairage approfondi sur les mécanismes par lesquels la digitalisation, la fiscalité environnementale et les capacités énergétiques interagissent pour améliorer la qualité environnementale dans les pays étudiés. Ces constats invitent à une série d'actions concrètes destinées à renforcer l'impact des réformes dans chacune des économies nord-africaines.

Sur le plan fiscal, la constatation d'un effet cumulatif significatif des taxes environnementales sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre incite à réviser le cadre de la fiscalité environnementale. Il serait pertinent de mettre en place une tarification progressive des émissions, qui permettrait de pénaliser plus fortement les activités à forte intensité carbone. Par exemple, l'introduction d'un impôt environnemental à plusieurs paliers, où les entreprises dépassant un seuil d'émissions définies seraient soumises à des taux croissants, pourrait encourager la transition vers des technologies moins polluantes. Par ailleurs, l'instauration de mécanismes de compensation, tels que des crédits d'impôt ou des subventions pour l'investissement dans des technologies vertes, contribuerait à faciliter l'adaptation des entreprises aux exigences d'une économie à faibles émissions, tout en générant des revenus qui pourraient être réinvestis dans le développement d'infrastructures énergétiques renouvelables.

La modernisation des infrastructures numériques et énergétiques représente également un levier essentiel. Les politiques publiques devraient favoriser l'extension des réseaux de communication et la modernisation des infrastructures électriques. À cet égard, il serait opportun de lancer des programmes d'investissement ciblés visant à améliorer la connectivité dans les zones rurales et moins développées, afin de garantir un accès équitable aux technologies numériques. La création de partenariats public-privé (PPP) pour financer la construction de réseaux intelligents, accompagnée d'un plan d'actions pour la formation des acteurs locaux, permettrait non seulement d'améliorer la gestion des ressources énergétiques, mais aussi de stimuler l'innovation locale dans le domaine des TIC, comme le suggèrent les travaux de Ghorfi et al. (2025).

Dans un contexte où l'interdépendance entre les économies nord-africaines est avérée, la coordination des politiques de transition énergétique apparaît comme une nécessité stratégique. Les gouvernements pourraient envisager la mise en place d'un comité régional ou d'un mécanisme de coopération transfrontalière dédié à l'harmonisation des politiques environnementales et fiscales. Une telle instance favoriserait l'échange de bonnes pratiques et

la réalisation de projets communs, comme la construction d'interconnexions électriques ou le développement de parcs solaires régionaux, qui profiteraient à l'ensemble des pays concernés. Ces initiatives seraient particulièrement adaptées pour répondre aux recommandations d'Ullah et al. (2024) en matière de coopération régionale.

Concernant les actions spécifiques à chaque pays, l'Égypte, dont la structure économique demeure fortement orientée vers les énergies conventionnelles, devrait prioriser la modernisation progressive de son parc énergétique. L'adoption d'un cadre réglementaire incitatif visant à faciliter l'investissement dans des solutions de décarbonation et le remplacement progressif des équipements obsolètes serait un levier déterminant pour favoriser la transition vers des sources d'énergie renouvelable. Des politiques de soutien à l'innovation, associées à des incitations fiscales pour la recherche et le développement dans le secteur énergétique, pourraient ainsi accélérer la transition.

Au Maroc, qui dispose déjà d'un fort potentiel en énergie solaire et éolienne, il conviendrait de renforcer les mécanismes de soutien financier à la production d'énergie renouvelable. La mise en place d'un système de tarifs de rachat garantis et d'incitations pour la création d'infrastructures de stockage d'énergie contribuerait à stabiliser le secteur et à attirer davantage d'investissements privés. Par ailleurs, la réforme du cadre fiscal, assortie de subventions ciblées pour les entreprises innovantes du secteur des énergies propres, permettrait de consolider les progrès déjà réalisés.

La Tunisie, quant à elle, présente un profil intermédiaire qui justifie une approche hybride. Il serait essentiel pour ce pays de poursuivre le renforcement de ses infrastructures numériques par le biais de programmes d'extension de la connectivité et de formations dédiées à l'optimisation de l'utilisation des TIC. En parallèle, des réformes fiscales spécifiques, adaptées aux réalités économiques locales, pourraient être mises en œuvre pour encourager l'investissement dans des solutions énergétiques plus propres. Le développement de projets pilotes régionaux visant à intégrer des technologies intelligentes dans la gestion des réseaux énergétiques, associé à des partenariats avec le secteur privé, constituerait une initiative exemplaire pour améliorer l'efficacité énergétique.

Ces orientations, qui combinent des réformes fiscales innovantes, des investissements ciblés dans les infrastructures et une coordination régionale renforcée, offrent des perspectives concrètes pour orienter la transition énergétique et numérique des économies nord-africaines vers une croissance plus durable et respectueuse de l'environnement.

5. Conclusion

Cette recherche visait à analyser la dynamique complexe liant la digitalisation, la fiscalité environnementale et la capacité des ressources énergétiques à la qualité environnementale dans trois pays d'Afrique du Nord : l'Égypte, le Maroc et la Tunisie. Les résultats obtenus mettent en évidence que la croissance économique initiale est associée à une augmentation des émissions de gaz à effet de serre, conformément à la théorie de la courbe environnementale de Kuznets. Toutefois, les effets à long terme révèlent que des mesures telles que l'augmentation des recettes fiscales environnementales et le renforcement des infrastructures énergétiques et numériques favorisent une amélioration progressive de la qualité environnementale. Par ailleurs, l'analyse indique que l'investissement dans les technologies de l'information et de la communication contribue à améliorer l'efficacité énergétique, bien que ses retombées sur la réduction des émissions ne se manifestent pleinement qu'à plus long terme. Ces constats soulignent l'importance d'une politique économique et environnementale intégrée, capable de transformer les défis structurels en leviers de développement durable.

Au vu de ces résultats, il apparaît que les mesures fiscales, bien qu'elles produisent des effets modérés à court terme, se traduisent par des retombées significatives à long terme en incitant les acteurs économiques à adopter des pratiques plus respectueuses de l'environnement. De même, l'amélioration des capacités énergétiques et la modernisation numérique apparaissent comme des piliers essentiels pour limiter l'impact des activités économiques sur la dégradation environnementale. Ces conclusions, en accord avec certaines études récentes, fournissent ainsi une base empirique solide pour envisager des stratégies de transition qui soient à la fois économiquement viables et écologiquement soutenables.

Néanmoins, certaines limites méthodologiques et empiriques méritent d'être soulignées. La disponibilité limitée de données granulaire peut restreindre la capacité d'analyse fine des composantes des indices utilisés et, par conséquent, masquer des effets spécifiques qui pourraient varier en fonction des secteurs ou des zones géographiques. De plus, l'approche adoptée, qui se fonde principalement sur des modèles linéaires, ne permet pas encore de capturer les effets non linéaires et asymétriques susceptibles d'influencer la dynamique environnementale. Ces points indiquent la nécessité d'approfondir l'analyse en intégrant des indicateurs institutionnels et socio-économiques plus détaillés, ainsi qu'en adoptant des méthodologies capables de mieux appréhender la complexité des interactions en jeu.

Les perspectives de recherche futures pourraient consister à effectuer une désagrégation plus fine des indices de capacité pour isoler les effets spécifiques, ainsi qu'à explorer les dimensions institutionnelles et comportementales de l'efficacité des politiques environnementales. L'adoption d'approches économétriques permettant d'examiner les relations non linéaires et les effets asymétriques constituerait également une avancée significative. Ces travaux complémentaires permettront d'enrichir la compréhension des seuils critiques à dépasser pour assurer une transition énergétique réussie, tout en fournissant aux décideurs des outils d'analyse adaptés aux réalités spécifiques de l'Égypte, du Maroc et de la Tunisie.

Références

Abu Alfoul, M. N., Khatatbeh, I. N., & Bazhair, A. H. (2024). The effect of ICT usage on economic growth in the MENA region: Does the level of education matter? *Economies*, 12(10), 267. <https://doi.org/10.3390/economies12100267>

Al-Zubairi, A., AL-Akheli, A., & ELfarra, B. (2024). The impact of financial development, renewable energy and political stability on carbon emissions: Sustainable development prospective for Arab economies. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04703-5>

Arbia, A., & Sobhi, K. (2024). Foreign direct investment, information and communication technology, and economic growth: The case of North African countries. *Scientific African*, 24, e02234. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02234>

Asli, H. E., Hamid, L., Zineb, A., & Mohamed, A. (2024). Impact of human capital, economic factors, energy consumption, and urban growth on environmental sustainability in Morocco: An ARDL approach. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 14(2), 656–668. <https://doi.org/10.32479/ijeep.15601>

Bala, H., & Khatoon, G. (2024). Effect of green taxation on renewable energy technologies: An analysis of commonwealth and non-commonwealth countries in Sub-Saharan Africa. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(8), 11933–11949. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-31879-0>

- Baltagi, B. H. (Ed.). (2015). *The Oxford handbook of panel data*. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199940042.001.0001>
- Ben Azzeddine, B., Hossaini, F., & Savard, L. (2024). Greenhouse gas emissions and economic growth in Morocco: A decoupling analysis. *Journal of Cleaner Production*, 450, 141857. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141857>
- Ben Lahouel, B., Taleb, L., Managi, S., & Guesmi, K. (2022). The threshold effects of ICT on CO2 emissions: Evidence from the MENA countries. *Environmental Economics and Policy Studies*, 26(2), 285–305. <https://doi.org/10.1007/s10018-022-00346-w>
- Ben Youssef, A., & Dahmani, M. (2024a). Assessing the impact of digitalization, tax revenues, and energy resource capacity on environmental quality: Fresh evidence from CS-ARDL in the EKC framework. *Sustainability*, 16(2), 474. <https://doi.org/10.3390/su16020474>
- Ben Youssef, A., & Dahmani, M. (2024b). Evaluating environmental sustainability in Africa: The role of environmental taxes, productive capacities, and urbanization dynamics. *Economies*, 12(4), 80. <https://doi.org/10.3390/economies12040080>
- Ben Youssef, A., Dahmani, M., & Mabrouki, M. (2024c). Decoupling carbon emissions and economic growth in Tunisia: Pathways to sustainable development. In *Handbook on Energy and Economic Growth* (pp. 103–127). <https://doi.org/10.4337/9781802204803.00012>
- Bergougui, B., & Meziane, S. (2025). Assessing the impact of green energy transition, technological innovation, and natural resources on load capacity factor in Algeria: Evidence from dynamic autoregressive distributed lag simulations and machine learning validation. *Sustainability*, 17(5), 1815. <https://doi.org/10.3390/su17051815>
- Chudik, A., Mohaddes, K., Pesaran, M. H., & Raissi, M. (2016). Long-run effects in large heterogeneous panel data models with cross-sectionally correlated errors. In *Essays in Honor of Aman Ullah* (pp. 85–135). <https://doi.org/10.1108/s0731-905320160000036013>
- Chudik, A., Mohaddes, K., Pesaran, M. H., & Raissi, M. (2017). Is there a debt-threshold effect on output growth? *Review of Economics and Statistics*, 99(1), 135–150. https://doi.org/10.1162/rest_a_00593
- Dada, J. T., Akinlo, T., Ajide, F. M., Al-Faryan, M. A. S., & Tabash, M. I. (2025). Information communication and technology, and environmental degradation in Africa: A new approach via moments. *Information Technology for Development*, 1–27. <https://doi.org/10.1080/02681102.2024.2447575>
- Dahmani, M. (2024). Environmental quality and sustainability: Exploring the role of environmental taxes, environment-related technologies, and R&D expenditure. *Environmental Economics and Policy Studies*, 26(2), 449–477. <https://doi.org/10.1007/s10018-023-00387-9>
- Dahmani, M., & Ben Youssef, A. (2023). Unraveling the determinants of platform economy adoption in developing countries: An extended application of the UTAUT2 model with a privacy calculus perspective. *Platforms*, 1(1), 34–52. <https://doi.org/10.3390/platforms1010005>
- Dahmani, M., & Mabrouki, M. (2025). Human capital, innovation, governance and economic growth in resource-rich and resource-poor MENA countries: New evidence from the CS-ARDL approach. *Journal of the Knowledge Economy*. <https://doi.org/10.1007/s13132-024-02408-8>

- Dahmani, M., Mabrouki, M., & Ben Youssef, A. (2022a). ICT, trade openness and economic growth in Tunisia: What is going wrong? *Economic Change and Restructuring*, 55(4), 2317–2336. <https://doi.org/10.1007/s10644-022-09388-2>
- Dahmani, M., Mabrouki, M., & Ben Youssef, A. (2022b). The information and communication technologies-economic growth nexus in Tunisia: A cross-section dynamic panel approach. *Montenegrin Journal of Economics*, 18(2).* <https://doi.org/10.14254/1800-5845/2022.18-2.14>
- Dahmani, M., Mabrouki, M., & Ben Youssef, A. (2023). The ICT, financial development, energy consumption and economic growth nexus in MENA countries: Dynamic panel CS-ARDL evidence. *Applied Economics*, 55(10), 1114–1128. <https://doi.org/10.1080/00036846.2022.2096861>
- Domguia, E. N., Ngounou, B. A., Pondie, T. M., & Bitoto, F. E. (2024). Environmental tax and energy poverty: An economic approach for an environmental and social solution. *Energy*, 308, 132935. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132935>
- Elfarrar, B., Yasmeeen, R., & Shah, W. U. H. (2024). The impact of energy security, energy mix, technological advancement, trade openness, and political stability on energy efficiency: Evidence from Arab countries. *Energy*, 295, 130963. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130963>
- Enusah, A., Aboagye-Otchere, F., & Agyenim-Boateng, C. (2024). The effect of renewable energy aid and governance quality on environmental tax effort in Sub-Saharan Africa. *Energy Reports*, 11, 4165–4176. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.03.038>
- Eurostat. (2013). *Environmental taxes: A statistical guide (2013 ed.)*. European Commission.
- Evans, O. (2024). The investment dynamics in renewable energy transition in Africa: The asymmetric role of oil prices, economic growth and ICT. *International Journal of Energy Sector Management*, 18(2), 229–247. <https://doi.org/10.1108/ijesm-03-2022-0002>
- Fambeu, A. H., & Yomi, P. T. (2024). Do ICTs promote the renewable energy consumption? The moderating effects of economic growth and structural transformation in Africa. *International Economics*, 180, 100563. <https://doi.org/10.1016/j.inteco.2024.100563>
- Ghorfi, T., Laraqui, S., & Nachit, H. (2025). AI for energy management: Driving efficiency and sustainability in the MENA region. In *AI in the Middle East for Growth and Business* (pp. 145–175). https://doi.org/10.1007/978-3-031-75589-7_10
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991). Environmental impacts of a North American free trade agreement. *National Bureau of Economic Research*.
- Iddrisu, A. G., & Chen, B. (2024). Economic growth through digitalization in Africa: Does financial sector development play a mediating role? *International Journal of Emerging Markets*, 19(10), 3111–3138. <https://doi.org/10.1108/ijoem-02-2022-0278>
- Kraft, J., & Kraft, A. (1978). On the relationship between energy and GNP. *Journal of Energy and Development*, 3(2), 401–403.
- Leal-Arcas, R. (2025). Tunisia’s energy policymaking: The path to clean energy. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5105000>

- Mounkaila Gourouza, N. H., & Kouni, M. (2025). Green finance, energy transition, and biodiversity conservation in Africa: Dynamic panel analysis for the case of African countries. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5110589>
- Mushtaq, I., & Abre-Rehmat Qurat-ul-Ann. (2024). Dynamics of digitalization and energy efficiency in developing countries: An empirical analysis. *Journal of Development Policy Research & Practice (JoDPRP)*, 8(1), 1–23. <https://doi.org/10.59926/jodprp.vol08/01>
- OECD. (2019). Environmentally related tax revenue accounts: OECD methodological guidelines in line with the SEEA. *OECD*.
- OECD. (2025). Green growth indicators. Retrieved January 9, 2023, from https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=GREEN_GROWTH
- Okombi, I. F., & Ndoum Babouama, V. B.-D. (2024). Environmental taxation and inclusive green growth in developing countries: Does the quality of institutions matter? *Environmental Science and Pollution Research*, 31(21), 30633–30662. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33245-6>
- Pesaran, M. H. (2007). A simple panel unit root test in the presence of cross-section dependence. *Journal of Applied Econometrics*, 22(2), 265–312. <https://doi.org/10.1002/jae.951>
- Pesaran, M. H. (2015). Testing weak cross-sectional dependence in large panels. *Econometric Reviews*, 34(6–10), 1089–1117. <https://doi.org/10.1080/07474938.2014.956623>
- Pesaran, M. H. (2021). General diagnostic tests for cross-sectional dependence in panels. *Empirical Economics*, 60(1), 13–50. <https://doi.org/10.1007/s00181-020-01875-7>
- Pesaran, M. H., & Yamagata, T. (2008). Testing slope homogeneity in large panels. *Journal of Econometrics*, 142(1), 50–93. <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2007.05.010>
- Routabi, A., & Bennani, B. (2024). Digital marketing strategies for enhancing the sustainable attractiveness of smart cities in Morocco. *Sustainable and Intelligent Territorial Marketing and Entrepreneurship*, 1–32. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-9775-6.ch001>
- Sarabdeen, M., Elhaj, M., & Alofaysan, H. (2024). Exploring the influence of digital transformation on clean energy transition, climate change, and economic growth among selected oil-export countries through the panel ARDL approach. *Energies*, 17(2), 298. <https://doi.org/10.3390/en17020298>
- Shouwu, J., Xu, T., Shehzad, K., Zaman, B. U., & Wuyue, L. (2024). The role of environmental technologies and clean energy transition in shaping the N-shaped environmental Kuznets curve: A North African perspective. *Environmental Technology & Innovation*, 33, 103463. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103463>
- Ullah, A., Nobanee, H., Ullah, S., & Ifikhar, H. (2024). Renewable energy transition and regional integration: Energizing the pathway to sustainable development. *Energy Policy*, 193, 114270. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114270>
- UNCTAD. (2025). Productive capacities index (PCI). Retrieved January 9, 2023, from <https://unctadstat.unctad.org/datacentre/dataviewer/US.PCI>
- Westerlund, J. (2007). Testing for error correction in panel data. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 69, 709–748. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0084.2007.00477.x>

Xiangling, L., & Qamruzzaman, Md. (2024). The role of ICT investment, digital financial inclusion, and environmental tax in promoting sustainable energy development in the MENA region: Evidences with dynamic common correlated effects (DCE) and instrumental variable-adjusted DCE. *PLOS ONE*, *19*(5), e0301838. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0301838>