



Munich Personal RePEc Archive

# **Digitalization, energy transition and economic growth in north africa: a dynamic analysis using the CS-ARDL model**

Amayed, Yassr

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/124124/>  
MPRA Paper No. 124124, posted 29 Mar 2025 14:47 UTC

# **Digitalisation, Transition Énergétique et Croissance Économique en Afrique du Nord : Une Analyse Dynamique à l'Aide du Modèle 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](mailto:yaser.amayed70@gmail.com)

**Résumé :** Cet article analyse l'impact de la digitalisation et de la transition énergétique sur la croissance économique en Afrique du Nord, dans une optique de développement durable. À l'aide du modèle CS-ARDL, il distingue les effets à court terme des ajustements dynamiques et met en évidence les relations structurelles à long terme découlant des investissements en capital fixe, de la consommation énergétique – qu'elle soit renouvelable ou non – et de l'adoption des technologies de l'information et de la communication (TIC). Les résultats montrent qu'à court terme, l'activité économique est principalement stimulée par les investissements productifs et la dépendance aux énergies fossiles. À long terme, l'intégration progressive des énergies renouvelables et l'amélioration des infrastructures numériques contribuent à une croissance plus inclusive et résiliente, en cohérence avec les Objectifs de développement durable. Par ailleurs, l'étude met en lumière d'importantes disparités structurelles et régionales, soulignant ainsi la nécessité de politiques publiques adaptées et coordonnées pour maximiser les synergies entre digitalisation et transition énergétique.

**Mots-clés :** Digitalisation, énergies renouvelables, TIC, transition énergétique, croissance économique, développement durable, Afrique du Nord, CS-ARDL.

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

## 1. Introduction

Face à l'épuisement progressif des ressources fossiles, à la dégradation croissante de l'environnement et aux inégalités socio-économiques persistantes, la transformation numérique et la transition énergétique émergent comme des leviers stratégiques pour repenser les modèles de développement en Afrique du Nord. Ces dynamiques s'inscrivent dans le cadre des **transitions jumelles**, qui visent simultanément à moderniser les économies et à réduire leur empreinte carbone. Les Objectifs de développement durable (ODD), définis par les Nations Unies en 2015, offrent un cadre normatif encourageant l'essor des technologies émergentes et l'adoption de solutions innovantes pour promouvoir une croissance plus inclusive et respectueuse de l'environnement.

Historiquement, les recherches économiques ont accordé une place centrale à l'énergie dans le processus de production, comme l'illustrent les travaux fondateurs de Kraft et Kraft (1978). Cependant, les transformations récentes – marquées par l'essor des technologies de l'information et de la communication (TIC), l'intelligence artificielle, l'industrie 4.0 et l'émergence de l'industrie 5.0, ainsi que par l'essor des objets connectés – imposent une approche élargie. Parallèlement, la transition vers les énergies renouvelables modifie en profondeur les mécanismes de croissance. Dans cette optique, Fambeu et Yomi (2024) mettent en évidence le rôle catalyseur du développement des services numériques dans l'augmentation de l'utilisation des énergies renouvelables dans des économies en mutation structurelle. De même, Becha et al. (2023) démontrent que des chocs positifs liés aux importations de TIC peuvent avoir un effet significatif sur la croissance économique. Ces résultats soulignent l'importance d'une infrastructure numérique robuste et d'un mix énergétique optimisé pour garantir une croissance durable.

D'autres travaux, notamment ceux de Chi et al. (2023) et de Benali et Benabbou (2023), apportent des preuves empiriques sur l'impact positif de l'adoption accélérée de technologies à faible émission de carbone. En favorisant une réduction de l'empreinte environnementale et en soutenant un développement durable, la digitalisation apparaît non seulement comme un moteur de modernisation industrielle, mais aussi comme un levier d'innovation pour relever les défis écologiques. Les avancées technologiques, en particulier dans le domaine de l'intelligence artificielle, ouvrent de nouvelles perspectives pour améliorer l'efficacité énergétique et accélérer la transition vers des systèmes de production plus respectueux de l'environnement, en cohérence avec les ambitions des ODD.

Dans ce contexte, cette étude adopte une approche empirique basée sur le modèle CS-ARDL, permettant d'analyser simultanément les effets dynamiques à court terme et les relations structurelles à long terme entre la digitalisation, la consommation énergétique et la croissance économique. Cette méthodologie, adaptée aux interdépendances régionales et à la variabilité structurelle des économies nord-africaines, permet d'examiner les interactions entre investissements en capital fixe, consommation d'énergies (renouvelables et non renouvelables) et diffusion des technologies numériques, afin de mieux comprendre leurs implications sur la trajectoire économique de la région. L'objectif est d'offrir une base empirique solide pour formuler des recommandations politiques adaptées aux spécificités nationales et promouvoir une coordination régionale efficace en faveur d'un développement durable.

Le reste de cet article est structuré comme suit : la section 2 présente une revue critique des travaux antérieurs, mettant en évidence les avancées et les limites des études sur l'interaction

entre digitalisation, transition énergétique et croissance économique. La section 3 expose le cadre théorique et la méthodologie, en détaillant la spécification du modèle CS-ARDL et les données de panel utilisées. La section 4 analyse les résultats empiriques, en distinguant les effets à court terme des relations structurelles à long terme, et discute les implications politiques qui en découlent. Enfin, la section 5 conclut en résumant les principaux enseignements et en suggérant des pistes de recherche pour approfondir l'étude des transitions jumelles dans le cadre du développement durable.

## 2. Revue de la littérature

Depuis Kraft et Kraft (1978), l'étude du rôle de l'énergie dans la production a constitué le socle des débats sur la croissance économique. Au fil du temps, face aux défis posés par l'épuisement des ressources énergétiques et l'aggravation des dégradations environnementales, la recherche a progressivement intégré la dimension de la digitalisation et de la transition énergétique comme leviers potentiels du développement durable. Dans ce contexte, l'impact des TIC sur la transformation des systèmes énergétiques et la qualité environnementale a suscité un intérêt croissant, notamment en Afrique du Nord.

Les travaux de Fambeu et Yomi (2024) illustrent que le développement des services Internet et l'exportation de services TIC stimulent la consommation d'énergies renouvelables, en particulier dans les économies en forte croissance et en pleine transformation structurelle. Leur analyse met en exergue l'effet modérateur de la croissance économique et des processus de transformation sur l'optimisation du mix énergétique. Parallèlement, Becha et al. (2023) se penchent sur la nature symétrique et asymétrique des impacts de la digitalisation, révélant que des chocs positifs liés aux importations de TIC peuvent stimuler significativement la croissance, tandis que les effets négatifs de chocs contraires ne se traduisent pas de manière équivalente. Ces constats soulignent la nécessité de renforcer les infrastructures numériques pour assurer une croissance autonome et résiliente.

Dans le contexte nord-africain, l'importance des énergies renouvelables est également largement reconnue. Chi et al. (2023) montrent que l'index du trilemme énergétique, qui intègre durabilité environnementale, sécurité énergétique et accessibilité, joue un rôle déterminant dans le progrès économique de la région. Ils positionnent l'adoption accélérée des énergies à faible émission de carbone comme un levier essentiel pour une croissance durable. En parallèle, Benali et Benabbou (2023) démontrent, à travers une analyse du cas marocain, que les investissements dans des infrastructures énergétiques renouvelables non seulement améliorent la croissance à long terme, mais contribuent également à la réduction des émissions de carbone, illustrant ainsi le potentiel économique de la transition énergétique.

La dimension environnementale de la transition énergétique constitue un axe central dans les études récentes. Charfeddine et al. (2024) montrent, à travers l'utilisation d'un indice global de digitalisation, que la gestion numérique efficiente contribue à améliorer la qualité environnementale en atténuant les pressions sur l'environnement, malgré la diversité des indicateurs individuels liés aux TIC. Par ailleurs, Dahmani et Mabrouki (2025) recourent au modèle CS-ARDL pour examiner l'influence du capital humain, de l'innovation et de la gouvernance sur la croissance dans la région MENA. Leurs résultats révèlent que les effets à court et à long terme varient en fonction du contexte des ressources et de la structure institutionnelle, permettant ainsi de distinguer les économies riches des économies moins dotées en ressources naturelles. De plus, les travaux de Ben Youssef et Dahmani (2024a, 2024b, 2024c) examinent l'interaction entre les politiques environnementales, l'urbanisation et la digitalisation. Leur approche économétrique avancée démontre que l'implémentation de taxes environnementales, combinée à des stratégies visant à promouvoir des capacités

productives durables, favorise une convergence des trajectoires vers une meilleure qualité environnementale. Cette convergence se traduit par une réduction des émissions de carbone et une amélioration de la durabilité énergétique, malgré des fluctuations à court terme. Enfin, les recherches de Dahmani et Ben Youssef (2023) et Dahmani et al. (2022a, 2022b, 2023) approfondissent ces constats dans le contexte tunisien. Elles soulignent que l'impact des TIC sur la valeur ajoutée diffère significativement selon les secteurs d'activité. Par conséquent, il est impératif d'adapter les réformes organisationnelles et les stratégies sectorielles pour optimiser les bénéfices de la digitalisation dans le cadre de la transition énergétique.

L'analyse institutionnelle et éducative joue également un rôle déterminant dans ce contexte. Yahyaoui (2024) montre que l'impact des TIC sur les émissions de CO<sub>2</sub> varie en fonction des politiques nationales, suggérant qu'une gestion optimale des technologies numériques peut atténuer les effets environnementaux négatifs, alors qu'une planification inadéquate tend à les exacerber. Dans le même ordre d'idées, Abu Alfoul et al. (2024) soulignent l'importance du niveau d'éducation dans la maximisation des bénéfices des TIC, indiquant qu'un système éducatif performant contribue non seulement à renforcer les compétences numériques, mais aussi à limiter les effets néfastes tels que la fuite des cerveaux, qui freine l'innovation et l'efficacité des investissements.

Au-delà des aspects purement numériques, plusieurs études se concentrent sur les investissements dans la transition énergétique. Evans (2024) met en lumière l'impact des fluctuations des prix du pétrole sur les investissements dans les énergies renouvelables. Il révèle que la variation des prix, par effet de substitution, influence directement le volume des investissements dans le renouvelable. Bergougui et Meziane (2025) montrent quant à eux que l'innovation technologique et la complexité économique jouent un rôle modérateur essentiel sur la performance énergétique, particulièrement dans des économies dépendantes des hydrocarbures comme l'Algérie. De plus, Arbia et Sobhi (2024) examinent comment l'investissement direct étranger, en interaction avec les infrastructures TIC, peut moduler la croissance économique dans les pays nord-africains, soulignant l'importance des politiques d'inclusion numérique. Ces résultats suggèrent que des politiques visant à renforcer la digitalisation et à améliorer les infrastructures TIC peuvent, en synergie avec une gestion rigoureuse des ressources, stimuler l'investissement dans des technologies propres.

L'intégration régionale constitue un autre axe d'analyse pertinent. Ullah et al. (2024) démontrent que la coopération entre pays, par le biais de mécanismes d'intégration régionale, peut renforcer l'impact positif des transitions vers les énergies renouvelables sur le développement durable. Dans le même temps, Sarabdeen et al. (2024) examinent comment la transformation numérique peut faciliter la transition vers une économie à faible émission de carbone, en favorisant une coordination des efforts pour lutter contre le changement climatique et promouvoir des modèles de développement plus respectueux de l'environnement.

La recherche sur les technologies émergentes apporte enfin une dimension innovante à ce débat. Lee et al. (2024) explorent le potentiel de l'intelligence artificielle pour accélérer la transition énergétique. Ils constatent que les avancées dans ce domaine, combinées à la digitalisation, améliorent la capacité des économies à adopter des technologies propres et à optimiser leur efficacité énergétique. Dans le même sens, Shouwu et al. (2024) mettent en évidence que l'intégration de technologies environnementales dans le mix énergétique permet de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et d'améliorer la qualité de l'environnement. Des contributions systématiques, telles que celles de Blimpo et al. (2024) et de Sarsar et Echaoui (2024), offrent une vision macroéconomique en analysant comment la complexité économique et l'intégration des politiques influencent la transition énergétique et

la croissance. Elles invitent ainsi à adopter des cadres politiques nuancés qui tiennent compte des spécificités de chaque contexte.

Par ailleurs, Alariqi et al. (2023) insistent sur la nécessité d'adopter des politiques intégrées qui favorisent le développement de technologies à faible émission de carbone tout en réduisant les subventions aux énergies fossiles. Cette stratégie renforcerait le potentiel de croissance à long terme tout en respectant les objectifs environnementaux mondiaux. Dans le même temps, les analyses d'Iddrisu et Chen (2024) montrent que la digitalisation, lorsqu'elle est associée à un développement adéquat du secteur financier, peut contribuer de manière significative à la croissance économique, même si cet effet reste conditionné par le niveau d'éducation et par la capacité des pays à retenir les talents.

L'ensemble de ces contributions, qui s'appuient sur des méthodes économétriques avancées telles que le CS-ARDL et d'autres techniques de panel, illustre la diversité des approches employées pour analyser la synergie entre digitalisation, transition énergétique et développement durable. Ces études mettent en exergue l'importance d'une coordination des politiques énergétiques et numériques, couplée à des investissements soutenus dans l'éducation et l'innovation, pour répondre aux défis posés par la transition vers une économie plus verte et inclusive. Les résultats obtenus offrent ainsi des pistes de réflexion essentielles pour la conception de stratégies politiques coordonnées, en phase avec les objectifs des accords internationaux et les objectifs de développement durable.

### 3. Cadre méthodologique et stratégie d'analyse

#### 3.1. Méthode d'analyse économétrique

##### 3.1.1. Cadre théorique et spécification du modèle

Dans le présent article, l'impact de la consommation énergétique et de la digitalisation sur la croissance économique en Afrique du Nord est analysé en s'appuyant sur le modèle de croissance néoclassique de Solow (1956) enrichi par Mankiw et al. (1992). Ce cadre théorique postule que la croissance économique résulte d'une fonction de production de type Cobb–Douglas qui intègre simultanément le capital physique, l'énergie et les TIC. La fonction de production se formule de manière générale comme suit :

$$Y_{it} = A_t \prod_{k=1}^K X_{kit}^{\alpha_k}, \quad \text{avec } 0 < \alpha_k < 1,$$

où  $Y_{it}$  désigne le produit intérieur brut réel pour le pays  $i$  à l'année  $t$  et  $X_{kit}$  représente le vecteur des  $K$  variables explicatives, à savoir le capital physique, la consommation énergétique et les TIC. Le terme  $A_t$  symbolise le progrès technologique commun à tous les pays et  $\alpha_k$  correspond aux élasticités associées aux différentes variables explicatives. Pour faciliter l'estimation économétrique et permettre une interprétation directe des coefficients comme élasticités, le modèle est linéarisé en appliquant le logarithme naturel, ce qui conduit à l'équation suivante :

$$\ln(Y_{it}) = \ln(A_t) + \sum_{k=1}^K \alpha_k \ln(X_{kit}).$$

Dans ce contexte,  $i$  recouvre les cinq pays d'Afrique du Nord étudiés (Algérie, Égypte, Mauritanie, Maroc et Tunisie),  $t$  correspond à la période allant de 1990 à 2022 et  $k$  désigne les cinq variables explicatives retenues. Afin de saisir les interactions entre digitalisation,

consommation énergétique et croissance économique, le modèle intègre spécifiquement l'équation suivante :

$$\ln(GDP\_CAP_{it}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(GFCF\_CAP_{it}) + \beta_2 \ln(NONREN\_ENERGY\_CAP_{it}) + \beta_3 \ln(REN\_ENERGY\_CAP_{it}) + \beta_4 \ln(ICT_{it}) + \varepsilon_{it}.$$

Dans cette spécification,  $\ln(GDP\_CAP_{it})$  représente le logarithme du produit intérieur brut par habitant, variable dépendante de l'analyse.  $\ln(GFCF\_CAP_{it})$  correspond au logarithme de la formation brute de capital fixe par habitant, ce qui traduit le stock de capital physique. De même,  $\ln(NONREN\_ENERGY\_CAP_{it})$  mesure le logarithme de la consommation d'énergie non renouvelable par habitant et reflète la dépendance aux combustibles fossiles, tandis que  $\ln(REN\_ENERGY\_CAP_{it})$  désigne le logarithme de la consommation d'énergie renouvelable par habitant, illustrant les efforts de transition énergétique. Par ailleurs,  $\ln(ICT_{it})$  est le logarithme de l'indice des TIC et sert d'indicateur du niveau de digitalisation. Le progrès technologique, noté  $\ln(A_t)$ , est supposé constant et intégré dans l'ordonnée à l'origine représentée par  $\beta_0$ . Les coefficients,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  et  $\beta_4$  se prêtent à l'interprétation suivante : une valeur positive de  $\beta_1$  implique qu'une augmentation de la formation brute de capital fixe par habitant s'accompagne d'une hausse proportionnelle du PIB par habitant ;  $\beta_2 > 0$  suggère que la consommation d'énergie non renouvelable contribue positivement à la croissance économique malgré ses retombées environnementales négatives ;  $\beta_3 > 0$  indique que la consommation d'énergie renouvelable soutient une croissance durable même si son impact peut être limité par des infrastructures insuffisantes ; enfin,  $\beta_4 > 0$  traduit que la digitalisation, mesurée à travers l'indice ICT, améliore l'efficacité économique et stimule l'innovation, contribuant ainsi positivement à la croissance. Ce cadre méthodologique constitue une base analytique robuste pour examiner en profondeur comment la digitalisation et la consommation énergétique influencent le développement économique dans la région nord-africaine.

### 3.1.2. Sources et présentation des données

L'analyse empirique présentée dans cet article repose sur des données issues des bases de données des Indicateurs du développement dans le monde (WDI, 2025) de la Banque mondiale et de l'Agence d'information sur l'énergie (EIA, 2025). Ces deux sources ont été choisies en raison de leur fiabilité, de leur couverture étendue et de la comparabilité qu'elles offrent pour les indicateurs économiques, énergétiques et technologiques. Ainsi, les variables sélectionnées reflètent des dimensions clés de la transition énergétique et de la croissance économique dans les pays étudiés, à savoir l'Algérie, l'Égypte, la Mauritanie, le Maroc et la Tunisie.

Les données utilisées incluent le produit intérieur brut par habitant, la formation brute de capital fixe par habitant, la consommation d'énergie non renouvelable et la consommation d'énergie renouvelable par habitant, ainsi qu'un indice des TIC. Ces indicateurs permettent d'appréhender les interactions entre la performance économique, le niveau des investissements productifs, la dépendance énergétique et le degré de digitalisation des économies étudiées. Les variables économiques et énergétiques sont exprimées en dollars constants de 2015 pour le produit intérieur brut et la formation brute de capital fixe par

habitant, ce qui garantit une mesure homogène de la performance économique et des investissements dans les infrastructures productives. La consommation d'énergie non renouvelable par habitant, mesurée en tonnes équivalent pétrole, offre une indication précise de la dépendance aux combustibles fossiles, tandis que la consommation d'énergie renouvelable par habitant permet d'évaluer les efforts déployés pour opérer la transition énergétique vers des sources plus durables. Par ailleurs, l'indice des TIC, construit à partir de la moyenne des abonnements au téléphone fixe, des abonnements à la téléphonie mobile (pour 100 habitants) et de la proportion d'utilisateurs d'internet, fournit une vision globale du niveau de digitalisation des pays étudiés.

Les statistiques descriptives des variables, présentées au Tableau 1, offrent un aperçu des disparités économiques, énergétiques et technologiques observées sur la période allant de 1990 à 2022. Ce tableau met en exergue, par exemple, une moyenne de 2 821,49 USD pour le produit intérieur brut par habitant avec un écart-type de 1 024,57 USD, ce qui traduit des différences marquées entre les pays. De même, la formation brute de capital fixe par habitant présente une moyenne de 703,42 USD et des variations importantes, illustrant des niveaux contrastés d'investissements productifs. La consommation d'énergie non renouvelable par habitant atteint en moyenne 0,70 tonne équivalent pétrole, tandis que la consommation d'énergie renouvelable demeure faible, avec une moyenne de 0,008 tonne équivalent pétrole, soulignant le retard dans l'adoption des ressources renouvelables. Quant à l'indice des TIC, sa moyenne de 26,97, accompagnée d'un écart-type de 25,09, met en lumière les écarts significatifs dans l'accès et l'utilisation des technologies numériques.

*Tableau 1 : Définitions des variables et statistiques descriptives*

Variable	GDP_CAP	GFCF_CAP	NONREN_EN ERGY_CAP	REN_ENE RGY_CAP	ICT
<b>Définition</b>	Produit intérieur brut par habitant (en dollars constants de 2015)	Formation brute de capital fixe par habitant (en dollars constants de 2015)	Consommation totale d'énergie non renouvelable par habitant (tep/habitant)	Consommation totale d'énergie renouvelable par habitant (tep/habitant)	Indice des TIC : Moyenne des abonnements fixes, mobiles (pour 100 hab.) et utilisateurs d'internet
<b>Source</b>	WDI	WDI	EIA	EIA	WDI
<b>Observations</b>	165	165	165	165	165
<b>Moyenne</b>	2 821,49	703,42	0,7	0,008	26,97
<b>Écart-type</b>	1 024,57	408,42	0,35	0,006	25,09
<b>Minimum</b>	1 252,10	81,94	0,16	0,0002	0,1
<b>Maximum</b>	4 768,73	2 019,83	1,52	0,026	77,56

L'évolution du produit intérieur brut par habitant, telle qu'observée dans les données, témoigne d'une progression significative dans la plupart des pays étudiés, bien que les rythmes de croissance varient considérablement d'un pays à l'autre. Par ailleurs, la tendance générale à la hausse de la formation brute de capital fixe, ainsi que les niveaux élevés de consommation d'énergie non renouvelable, illustrent respectivement l'importance des investissements productifs et la persistance d'une forte dépendance aux hydrocarbures. La faible contribution des énergies renouvelables et l'essor spectaculaire de l'indice des TIC

indiquent quant à eux les défis et les opportunités liés à la transition énergétique et à la digitalisation.

### 3.1.3. Présentation et justification des modèles économétriques utilisés

Dans le cadre de l'analyse de l'impact de la digitalisation et de la consommation énergétique sur la croissance économique en Afrique du Nord, nous avons opté pour le modèle CS-ARDL (Cross-Sectional Augmented Autoregressive Distributed Lag) en raison de ses propriétés méthodologiques adaptées aux données de panel et aux objectifs de cette étude. Ce modèle étend l'approche ARDL traditionnelle en incorporant une combinaison linéaire des moyennes transversales des variables dépendantes et indépendantes, ce qui permet de corriger efficacement la corrélation des erreurs entre les pays, comme le démontrent Chudik et Pesaran (2015). Par ailleurs, l'inclusion d'un retard d'une année de la variable expliquée dans le processus de correction d'erreur – ce retard étant considéré comme faiblement exogène – renforce la robustesse de l'estimation, conformément aux constats d'Islam et al. (2022).

Le modèle CS-ARDL se distingue également par sa capacité à contrôler de manière significative les facteurs inobservables influençant les effets à long terme, offrant ainsi un cadre analytique complet pour l'évaluation simultanée des dynamiques à court et à long terme relatives à la digitalisation et à la transition énergétique. Cette approche se révèle particulièrement pertinente dans un contexte marqué par une dépendance transversale forte, tant à court qu'à long terme, comme en témoignent les travaux de Chudik et al. (2016, 2017) ainsi que ceux de Dahmani et Mabrouki (2025). En outre, Pesaran (2015, 2021) recommande l'utilisation du test de dépendance transversale (CD) pour détecter et quantifier les effets de co-corrélation potentiels issus de liens économiques forts entre les pays, une recommandation soutenue par Ben Youssef et Dahmani (2024b, 2024b) et Dahmani (2024) qui souligne l'importance d'estimer la dépendance entre les unités du panel. Ces considérations justifient pleinement le choix du modèle CS-ARDL dans notre analyse, lequel permet de modéliser simultanément les effets à court et à long terme tout en tenant compte des interactions structurelles et des interdépendances régionales entre les pays nord-africains étudiés.

La spécification économétrique du modèle CS-ARDL appliqué dans cette étude est la suivante :

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

Dans notre spécification,  $\ln(\text{GDP\_CAP}_{it})$  représente le logarithme du produit intérieur brut par habitant pour le pays  $i$  à l'année  $t$ ;  $\alpha_i$  capte l'effet fixe propre à chaque pays; les coefficients  $\beta_{ij}$  et  $\gamma_{ik}$  mesurent respectivement les effets retardés de la variable dépendante et des variables explicatives, dont les moyennes transversales  $\overline{\ln(\text{GDP\_CAP}_{t-j})}$  et  $\overline{\text{X}_{kt}}$  permettent de saisir les interactions entre pays et les influences globales. Le terme  $\delta D_t$  intègre les effets fixes temporels, tels que les chocs globaux ou les tendances communes, tandis que  $\mu_i$  et  $\varepsilon_{it}$  représentent respectivement les effets spécifiques aux pays et le terme d'erreur aléatoire.

La force du modèle CS-ARDL réside également dans sa flexibilité quant aux ordres d'intégration des variables, permettant l'inclusion de séries intégrées d'ordres différents (I(0) et I(1)), et dans sa capacité à modéliser simultanément les dynamiques à court et à long terme,

indispensable pour saisir l'impact différé des politiques économiques de digitalisation et de transition énergétique. De plus, sa robustesse dans le cas de petits échantillons en fait un choix judicieux pour une étude comparative portant sur seulement cinq pays nord-africains.

La procédure d'estimation de notre étude repose sur l'application d'une série de tests préliminaires conçus pour garantir la robustesse des résultats. Dans un premier temps, nous utilisons le test de Pesaran (2015) afin d'identifier les dépendances transversales entre les pays, suivi du test de Pesaran et Yamagata (2008) qui permet de prendre en compte l'hétérogénéité des relations structurelles entre les unités du panel. Pour s'assurer de la stationnarité des séries, nous employons le test CIPS (Cross-Sectionally Augmented Im, Pesaran, and Shin), lequel tient compte des interactions transversales. Ensuite, le test de cointégration en panel de Westerlund (2007) est appliqué afin de confirmer l'existence de relations stables à long terme entre les variables étudiées. Une fois ces conditions remplies, le modèle CS-ARDL est utilisé pour estimer de manière précise les dynamiques à court et à long terme, permettant ainsi de capter l'impact réel des politiques de digitalisation et de transition énergétique sur la croissance économique. L'intégration de ces étapes assure une analyse rigoureuse des interactions causales dans un contexte caractérisé par de fortes interdépendances régionales et des spécificités structurelles propres à chaque pays de l'échantillon.

### **3.2. Méthodologie d'estimation**

#### **3.2.1. Test de dépendance croisée**

L'analyse des interactions entre la digitalisation, la consommation énergétique et la croissance économique en Afrique du Nord doit prêter une attention particulière aux interdépendances structurelles et économiques entre les pays étudiés. La notion de dépendance croisée, telle que définie par Baltagi (2015), désigne la corrélation entre les résidus des différentes unités du panel, résultant de chocs économiques communs ou de caractéristiques partagées par les pays. La prise en compte de cette dépendance transversale est déterminante pour garantir la robustesse des estimations économétriques, car son absence pourrait biaiser l'impact estimé des variables explicatives sur la croissance et la consommation énergétique, et conduire ainsi à une interprétation erronée des effets de la digitalisation et des politiques énergétiques.

Afin de détecter et de mesurer cette interdépendance, nous avons appliqué le test de dépendance croisée proposé par Pesaran (2015, 2021) aux résidus des principales variables de l'analyse. Ce test permet d'évaluer si les erreurs non observées des différents pays présentent une corrélation, indiquant ainsi l'existence d'interactions économiques ou de chocs communs affectant simultanément plusieurs pays. Les résultats, présentés dans le Tableau 2, révèlent que toutes les variables principales, à savoir le logarithme du PIB par habitant (LnGDP\_CAP), la formation brute de capital fixe (LnGFCF\_CAP), la consommation d'énergie non renouvelable (LnNONREN\_ENERGY\_CAP), la consommation d'énergie renouvelable (LnREN\_ENERGY\_CAP) ainsi que l'indice des TIC (LnICT), affichent une dépendance croisée statistiquement significative à un niveau de 1 %. Ces résultats témoignent de l'influence mutuelle des dynamiques économiques et technologiques entre les pays étudiés et soulignent que les politiques économiques et technologiques d'un pays ne peuvent être analysées de manière isolée.

Par ailleurs, ces résultats soulignent l'importance d'une approche régionale dans l'élaboration des politiques énergétiques et numériques. Une coordination étroite entre les pays, par exemple par le biais d'initiatives communes ou de partenariats stratégiques, pourrait accroître l'efficacité des actions individuelles en matière de transition énergétique et de développement durable, et ainsi améliorer les performances économiques et environnementales collectives.

Ces constats justifient pleinement l'utilisation de modèles économétriques capables de corriger la dépendance croisée, tels que le modèle CS-ARDL adopté dans cette étude, qui intègre à la fois les dynamiques à court et à long terme et capture les interactions régionales ainsi que les interdépendances entre les pays nord-africains. **Tableau 2 : Résultats de l'analyse de la dépendance croisée**

<b>Variabes</b>	<b>CD</b>
PIB par habitant (LnGDP_CAP)	15,30***
Formation brute de capital fixe (LnGFCF_CAP)	13,95***
Consommation d'énergie non renouvelable (LnNONREN_ENERGY_CAP)	4,98***
Consommation d'énergie renouvelable (LnREN_ENERGY_CAP)	3,92***
Indice des TIC (LnICT)	17,99***

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

L'intégration de ces dimensions permet ainsi de mieux comprendre les liens complexes entre digitalisation, transition énergétique et croissance économique, et de formuler des recommandations politiques adaptées aux réalités régionales.

### 3.2.2. Test d'hétérogénéité

Après avoir confirmé l'existence d'une dépendance transversale entre les pays d'Afrique du Nord, nous avons constaté que l'hétérogénéité des pentes dans l'analyse des données de panel pouvait profondément influencer les conclusions finales. Cette constatation souligne l'importance de prendre en compte les spécificités structurelles propres à chaque pays, car l'imposition de coefficients homogènes ne permettrait pas de saisir les différences d'impact des variables explicatives sur la croissance économique. En effet, les trajectoires de développement divergent considérablement d'un pays à l'autre, comme le révèlent les variations observées dans les politiques énergétiques et les niveaux de digitalisation. L'application du test d'homogénéité de Pesaran et Yamagata (2008) a permis de rejeter l'hypothèse d'homogénéité des pentes, révélant ainsi que les réponses des pays aux facteurs étudiés, tels que la formation brute de capital fixe, la consommation d'énergies renouvelables et l'indice des TIC, varient significativement. Les résultats obtenus, présentés dans le Tableau 3, indiquent une statistique delta de 16,838 et une statistique delta ajustée de 18,616, toutes deux accompagnées d'une p-value de 0,000.

**Tableau 3 : Résultats du test d'hétérogénéité**

	<b>Statistique <math>\Delta</math></b>	<b>P-value</b>
Test delta	16,838	0,000
Test delta ajusté	18,616	0,000

Ces constats illustrent clairement la nécessité d'utiliser des modèles économétriques flexibles qui intègrent à la fois les disparités structurelles et les interdépendances régionales. En tenant compte de ces hétérogénéités, il devient possible de formuler des recommandations politiques adaptées aux spécificités nationales tout en explorant les opportunités de coopération régionale pour optimiser les retombées économiques et environnementales de la transition énergétique et de la digitalisation.

### 3.2.3. Tests de racine unitaire en panel

L'évaluation de la stationnarité des séries temporelles constitue une étape fondamentale pour assurer la validité des résultats économétriques, car l'absence de stationnarité peut générer des

corrélations fallacieuses et compromettre ainsi la robustesse des conclusions. Dans le cadre de notre analyse, il est primordial de vérifier que les séries utilisées reflètent des dynamiques réelles plutôt que des tendances stochastiques incontrôlées. Étant donné que les données présentent une dépendance croisée confirmée, nous avons opté pour le test CIPS proposé par Pesaran (2007), lequel offre une robustesse accrue en présence d'interdépendances entre les unités du panel.

Les résultats des tests de racine unitaire, présentés dans le Tableau 4, indiquent que certaines variables, telles que la formation brute de capital fixe (LnGFCF\_CAP) et l'indice des TIC (LnICT), sont stationnaires en niveau (intégrées d'ordre zéro,  $I(0)$ ), ce qui signifie que leurs variations sont principalement expliquées par des fluctuations à court terme sans tendance stochastique à long terme. En revanche, le produit intérieur brut par habitant (LnGDP\_CAP), la consommation d'énergie non renouvelable (LnNONREN\_ENERGY\_CAP) et la consommation d'énergie renouvelable (LnREN\_ENERGY\_CAP) ne sont pas stationnaires en niveau, mais le deviennent après leur différenciation première, indiquant ainsi qu'elles sont intégrées d'ordre un ( $I(1)$ ). Ces constats confirment que la majorité des séries nécessitent une différenciation pour atteindre la stationnarité.

Ce constat justifie l'application de techniques économétriques appropriées, telles que l'analyse de cointégration, pour explorer les relations de long terme entre les variables étudiées. En effet, l'analyse de cointégration permet d'identifier des relations structurelles stables entre les variables intégrées d'ordre un – notamment le PIB par habitant, la consommation d'énergie non renouvelable et la consommation d'énergie renouvelable – et celles intégrées d'ordre zéro, telles que la formation brute de capital fixe et l'indice des TIC. Ces relations à long terme sont essentielles pour comprendre comment la digitalisation, les investissements dans les infrastructures énergétiques et la consommation énergétique interagissent entre eux et influent sur la croissance économique dans la région.

Les résultats obtenus revêtent également une importance stratégique pour les décideurs politiques, car ils démontrent que les dynamiques à court terme et à long terme doivent être analysées séparément pour formuler des recommandations adaptées. Par exemple, certaines politiques énergétiques et numériques peuvent générer des effets immédiats dans certains pays, tandis que dans d'autres, leur impact ne se matérialise qu'à plus long terme. L'intégration de ces dynamiques dans notre approche analytique permet ainsi une compréhension approfondie des interactions économiques et énergétiques dans les pays d'Afrique du Nord, et fournit une base solide pour l'élaboration de stratégies de transition énergétique et de numérisation adaptées aux spécificités régionales.

**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	
LnGDP_CAP	-1,908	-2,607	-4,907***	-5,218***	I(1)
LnGFCF_CAP	-3,617***	-3,466***	-4,500***	-4,268***	I(0)
LnNONREN_ENERGY_CAP	-0,877	-1,614	-5,926***	-6,056***	I(1)
LnREN_ENERGY_CAP	-1,739	-2,071	-5,655***	-5,783***	I(1)
LnICT	-4,108***	-3,930***	-5,024***	-5,227 ***	I(0)

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

L'intégration de ces résultats dans notre analyse nous permet ainsi d'aborder ultérieurement les relations de cointégration, étape décisive pour examiner l'impact structurel de la

digitalisation et de la transition énergétique sur la croissance économique dans la région nord-africaine.

### 3.2.4. Tests de cointégration

L'identification de relations à long terme entre les variables économiques et énergétiques retenues revêt une importance majeure pour comprendre les dynamiques structurelles sous-jacentes à la croissance économique et à la transition énergétique en Afrique du Nord. Dans un contexte caractérisé par des interdépendances économiques et la non-stationnarité de certaines séries temporelles, l'application d'un test de cointégration s'impose comme une étape indispensable de l'analyse empirique. En effet, la cointégration permet de déterminer si, malgré des fluctuations à court terme, les variables évoluent de manière stable et conjointe sur le long terme. Ce cadre analytique est particulièrement pertinent dans le contexte nord-africain, où les politiques fiscales et énergétiques, tout en générant des effets immédiats, poursuivent des objectifs cohérents à plus long terme en matière de transition énergétique et de durabilité économique.

Pour examiner ces relations, nous avons recours au test de cointégration en panel de Westerlund (2007), qui se distingue par sa capacité à intégrer l'hétérogénéité des coefficients entre les pays ainsi que la dépendance croisée résultant de chocs communs ou de caractéristiques structurelles partagées. Les particularités de chaque pays en termes de mix énergétique, d'infrastructures numériques et de stratégies économiques justifient l'adoption d'une approche méthodologique capable de concilier convergences régionales et spécificités nationales. Le test de Westerlund repose sur l'analyse des résidus issus des modèles de cointégration ; la stationnarité de ces résidus atteste alors que les variables évoluent de concert sur le long terme. Les tests  $G\tau$ ,  $G\alpha$ ,  $P\tau$  et  $P\alpha$ , qui permettent de distinguer une relation commune à l'ensemble des pays de celle propre à chaque pays, fournissent une évaluation exhaustive de la cointégration.

Les résultats présentés dans le Tableau 5 confirment l'existence de relations stables à long terme entre les variables étudiées. Les statistiques de cointégration sont significatives au niveau de 1 %, avec des p-values inférieures à 0,01 pour chacun des tests ( $G\tau$ ,  $G\alpha$ ,  $P\tau$  et  $P\alpha$ ). Ces résultats conduisent au rejet de l'hypothèse nulle d'absence de cointégration et indiquent que des variables telles que le PIB par habitant, la formation brute de capital fixe, la consommation d'énergie renouvelable et non renouvelable ainsi que l'indice des TIC convergent vers une dynamique commune à long terme. Cette convergence implique que les politiques économiques et énergétiques visant à augmenter la part des énergies renouvelables, à renforcer les infrastructures numériques ou à intensifier les investissements dans le capital physique produisent des effets mesurables et cohérents sur une période étendue, malgré des fluctuations conjoncturelles à court terme.

**Tableau 2 : Résultats des tests de cointégration**

Statistique	Valeur	Z-value	P-value
$G\tau$	-5,751	-8,201	0,000
$G\alpha$	-18,768	-2,795	0,003
$P\tau$	-15,175	-9,125	0,000
$P\alpha$	-23,290	-5,253	0,000

Les implications politiques de ces constats sont particulièrement importantes. La présence d'une cointégration entre les variables démontre que les variations conjoncturelles, telles que les crises économiques ou énergétiques, n'entravent pas nécessairement la réalisation des objectifs de transition énergétique et de croissance durable. Il apparaît donc essentiel que les

gouvernements des pays nord-africains privilégient des politiques cohérentes et soutenues à long terme, afin d'éviter des ajustements à court terme susceptibles de perturber la trajectoire positive observée.

#### 4. Résultats et discussions

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

La présente analyse empirique s'appuie sur l'estimation d'un modèle CS-ARDL appliqué aux données de panel des pays d'Afrique du Nord, dans le but d'évaluer l'impact de la digitalisation et de la transition énergétique sur la croissance économique, dans une perspective de développement durable. Ce modèle permet de distinguer les dynamiques à court terme, reflétant des ajustements rapides vers un équilibre de long terme, des relations structurelles à long terme qui traduisent les effets cumulatifs des politiques mises en œuvre. Les résultats, résumés dans le Tableau 6, révèlent un mécanisme d'ajustement efficace, illustré par un coefficient de correction d'erreur de -0,883, indiquant que près de 88 % des écarts par rapport à l'équilibre de long terme sont corrigés d'une année sur l'autre.

*Tableau 3 : Estimations des données de panel CS-ARDL : résultats à court et à long terme*

	Coefficient	Écart-type	Statistique Z	P-value
<b>Résultats à court terme</b>				
ECT (-1)	-0,883	0,157	-5,63	0,000
LnGFCF_CAP	0,189	0,056	3,70	0,001
LnNONREN_ENERGY_CAP	0,142	0,047	3,04	0,002
LnREN_ENERGY_CAP	0,030	0,013	2,23	0,026
LnICT	0,017	0,024	1,35	0,190
<b>Résultats à long terme</b>				
LnGFCF_CAP	0,217	0,060	2,93	0,003
LnNONREN_ENERGY_CAP	0,169	0,039	4,29	0,000
LnREN_ENERGY_CAP	0,053	0,025	3,64	0,000
LnICT	0,082	0,038	2,15	0,043
<b>Statistique CD</b>	0,36			0,718

À court terme, la formation brute de capital fixe par habitant (LnGFCF\_CAP) affiche un effet positif significatif (coefficient de 0,189,  $p = 0,001$ ), soulignant ainsi le rôle déterminant des investissements dans les infrastructures pour stimuler l'activité économique. Ce résultat rejoint ceux de Dahmani et al. (2022a) ainsi que ceux d'Iddrisu et Chen (2024), qui insistent sur l'importance des investissements productifs pour renforcer la croissance. Par ailleurs, la consommation d'énergie non renouvelable par habitant (LnNONREN\_ENERGY\_CAP) présente également une influence positive significative (coefficient de 0,142,  $p = 0,002$ ), ce qui confirme la persistance de la dépendance des économies de la région aux combustibles fossiles, en accord avec l'hypothèse de la croissance énergétique défendue par Chen et al. (2016) et Le et Quah (2018). La consommation d'énergie renouvelable par habitant (LnREN\_ENERGY\_CAP) exerce un effet positif modéré (coefficient de 0,030,  $p = 0,026$ ), indiquant que, bien que les énergies renouvelables soient progressivement intégrées dans le mix énergétique, leur impact immédiat demeure limité. Quant à l'indice des TIC (LnICT), il affiche un coefficient positif de 0,017 à court terme, mais cette influence n'atteint pas le seuil de signification ( $p = 0,190$ ), suggérant que les bénéfices économiques de la digitalisation nécessitent un horizon temporel plus étendu pour se matérialiser pleinement.

À long terme, les résultats mettent en évidence la robustesse des effets structurels. La formation brute de capital fixe par habitant continue de jouer un rôle majeur (coefficient de

0,217,  $p = 0,003$ ), confirmant l'importance des investissements dans les infrastructures comme moteur de croissance durable, en écho aux études de Ben Youssef et Dahmani (2024a). La consommation d'énergie non renouvelable persiste également comme un déterminant positif significatif (coefficient de 0,169,  $p = 0,000$ ), illustrant que, malgré les efforts pour diversifier les sources d'énergie, l'appui sur les combustibles fossiles reste notable dans la région. Toutefois, l'intégration des énergies renouvelables dans le mix énergétique a un effet positif à long terme (coefficient de 0,053,  $p = 0,000$ ), ce qui rejoint les conclusions de Chi et al. (2023) et de Benali et Benabbou (2023) qui identifient l'adoption accélérée des énergies à faible émission de carbone comme levier essentiel pour une croissance durable. En outre, l'indice des TIC devient significatif sur le long terme (coefficient de 0,082,  $p = 0,043$ ), ce qui met en évidence que la digitalisation contribue à améliorer l'efficacité économique et à stimuler l'innovation, un résultat compatible avec les constats de Dahmani et al. (2023) ainsi que d'Abu Alfoul et al. (2024).

Le Tableau 6 synthétise ces résultats, et la statistique de dépendance transversale (CD), affichant une valeur de 0,36 ( $p = 0,718$ ), confirme que l'approche adoptée par le modèle CS-ARDL respecte les particularités structurelles et les interdépendances régionales propres aux économies nord-africaines. Ces estimations fournissent ainsi une base solide pour comparer nos résultats aux constats de la littérature récente, qui insiste sur l'importance d'une stratégie intégrée alliant digitalisation et transition énergétique pour favoriser un développement durable. Elles ouvrent également la voie à une discussion approfondie sur leurs implications politiques dans une section dédiée ultérieurement.

## 4.2. Discussion des résultats

Les résultats obtenus, tant à court qu'à long terme, illustrent la complexité des interactions entre digitalisation, consommation énergétique et croissance économique dans les pays d'Afrique du Nord, offrant ainsi des éléments de comparaison intéressants avec la littérature récente. À court terme, l'importance des investissements en capital fixe apparaît clairement, comme le montre le coefficient positif de  $\text{LnGFCF\_CAP}$ , qui confirme que l'amélioration des infrastructures reste un levier déterminant pour stimuler l'activité économique immédiate. Par ailleurs, la contribution positive et significative de la consommation d'énergie non renouvelable souligne que, malgré les pressions environnementales, le recours aux combustibles fossiles continue de soutenir la croissance à court terme. Toutefois, l'effet modéré de la consommation d'énergie renouvelable suggère que, même si des progrès sont réalisés, l'intégration de ces sources alternatives demeure encore limitée sur le court terme. Cette observation rejoint les constats de Chi et al. (2023) et de Benali et Benabbou (2023), selon lesquels l'adoption accélérée des énergies à faible émission de carbone, bien que prometteuse, requiert une transformation structurelle approfondie.

Sur le plan des TIC, l'absence d'effet significatif à court terme (coefficient de  $\text{LnICT}$  non significatif) indique que les retombées économiques de la digitalisation peuvent nécessiter un délai d'incubation avant de se traduire par une croissance mesurable. Cela contraste avec la dynamique observée à long terme. En effet, l'analyse sur le long terme révèle une amélioration significative de l'impact des TIC sur la croissance économique, avec un coefficient positif de  $\text{LnICT}$ , en concordance avec les résultats de Dahmani et al. (2023) qui démontrent que la diffusion des TIC favorise l'innovation et optimise les processus industriels sur un horizon plus étendu. Ce décalage temporel dans l'influence des TIC renforce l'idée que la digitalisation, dans le cadre d'une transition énergétique réussie, nécessite des stratégies de développement à long terme qui tiennent compte des investissements en capital humain et de l'efficacité des infrastructures numériques.

Les résultats à long terme mettent également en évidence une dynamique positive soutenue par la consommation d'énergie renouvelable, dont l'impact, bien que modeste, est significatif. Ils indiquent que les politiques de transition énergétique contribuent à une amélioration progressive de la durabilité environnementale. La persistance d'un effet positif de la consommation d'énergie non renouvelable souligne quant à elle que les économies de la région demeurent en transition et que la diversification du mix énergétique reste un défi à relever pour atteindre une croissance plus verte. Ces constats sont en phase avec les travaux de Benali et Benabbou (2023) qui démontrent que, dans un contexte de transformation structurelle, les investissements dans des infrastructures renouvelables engendrent des retombées économiques durables et favorisent la réduction des émissions de carbone.

En outre, la robustesse de notre modèle CS-ARDL, qui intègre simultanément les effets à court et à long terme tout en tenant compte des interdépendances régionales, nous permet de comparer nos résultats aux études récentes qui insistent sur la nécessité d'une approche intégrée pour conjuguer digitalisation et transition énergétique au service du développement durable. Les études de Dahmani et Mabrouki (2025) ainsi que celles de Ben Youssef et Dahmani (2024a, 2024b) soulignent la complexité des interactions entre digitalisation, investissement productif et politiques environnementales, et notre analyse s'inscrit dans cette lignée en montrant que, pour maximiser les bénéfices de la transformation numérique et de la transition énergétique, il est indispensable d'adopter des stratégies à long terme, adaptées aux spécificités structurelles de chaque économie nord-africaine.

Les résultats présentés dans le Tableau 6 illustrent clairement ces dynamiques complexes et offrent une base empirique solide pour alimenter le débat sur l'efficacité des politiques de digitalisation et de transition énergétique pour le développement durable dans la région. Les écarts observés entre les effets à court terme, où la digitalisation semble encore nécessiter un délai pour se traduire en croissance économique significative, et ceux à long terme, qui révèlent un impact positif et structurant des TIC, renforcent l'idée que la transformation numérique, conjuguée à une transition vers des énergies renouvelables, constitue un levier essentiel pour construire un modèle de croissance inclusif et respectueux de l'environnement.

### **4.3. Implications politiques et recommandations**

Les résultats de notre étude suggèrent que la digitalisation et la transition énergétique offrent des leviers complémentaires pour renforcer la durabilité économique en Afrique du Nord, à condition d'adopter des stratégies politiques adaptées aux spécificités nationales et d'encourager une coordination régionale efficace. Dans ce contexte, la mise en place de politiques d'investissement dans les infrastructures TIC apparaît déterminante pour améliorer l'accès aux services numériques et optimiser le mix énergétique, comme l'indiquent les travaux de Fambeu et Yomi (2024) et de Becha et al. (2023). Ces initiatives contribuent à accroître la consommation d'énergies renouvelables et à stimuler une croissance économique plus résiliente, tout en facilitant la transition vers des technologies moins émettrices de carbone, comme le soulignent Chi et al. (2023) et Benali et Benabbou (2023).

Sur le plan institutionnel, la gestion optimale des TIC, soutenue par un système éducatif performant, constitue un élément central pour limiter les externalités négatives et favoriser l'innovation. Les constats de Yahyaoui (2024) et d'Abu Alfoul et al. (2024) illustrent l'importance de développer des compétences numériques et de renforcer la formation afin de réduire la fuite des cerveaux et de garantir que les investissements dans la digitalisation produisent des effets durables sur la croissance et la qualité environnementale.

Les politiques de transition énergétique doivent également tenir compte de la volatilité des marchés et des contraintes structurelles. Les analyses d'Evans (2024) et de Bergougui et

Meziane (2025) démontrent que la stabilisation des prix du pétrole et le soutien aux investissements dans les énergies renouvelables sont essentiels pour diversifier le mix énergétique et réduire la dépendance aux combustibles fossiles. Par ailleurs, l'incitation à l'investissement direct étranger, notamment via des politiques d'inclusion numérique, contribue à renforcer la compétitivité des économies de la région, comme le montre l'étude d'Arbia et Sobhi (2024).

En outre, l'intégration régionale apparaît comme un levier stratégique pour maximiser l'impact des politiques de digitalisation et de transition énergétique. Les mécanismes d'intégration, tels que ceux étudiés par Ullah et al. (2024) et Sarabdeen et al. (2024), facilitent le partage des meilleures pratiques et la mutualisation des ressources, permettant ainsi de réaliser des économies d'échelle et d'harmoniser les efforts nationaux pour atteindre les objectifs de développement durable.

Au niveau national, des recommandations spécifiques émergent : en Tunisie, il serait opportun de renforcer l'usage des TIC dans des secteurs stratégiques tout en menant des réformes dans les secteurs informels pour améliorer l'efficacité organisationnelle et encourager les investissements dans le solaire afin de diversifier le mix énergétique. Au Maroc, l'accent devrait être mis sur l'expansion des infrastructures numériques dans l'agriculture et la gestion de l'eau, en s'appuyant sur l'expérience des projets intégrés, afin de soutenir la compétitivité des PME et d'accélérer l'adoption des énergies propres. En Algérie, la diversification de l'économie non pétrolière par la digitalisation et l'innovation technologique est primordiale, avec une réorientation des recettes pétrolières vers des investissements dans des technologies renouvelables et des infrastructures TIC avancées. En Égypte, la modernisation des infrastructures, tant numériques qu'énergétiques, doit être consolidée par des partenariats public-privé, notamment dans le cadre de projets urbains majeurs, afin de réduire les inégalités territoriales et de dynamiser l'activité économique locale. Enfin, pour la Mauritanie, il convient d'accroître l'électrification des zones rurales par le développement de l'énergie solaire, tout en intégrant progressivement les TIC dans les services publics et l'éducation. Cela serait favorisé par une collaboration accrue avec des partenaires internationaux.

Ces orientations, qui s'appuient sur une analyse détaillée des interactions entre digitalisation et transition énergétique, offrent un cadre pour repenser la stratégie de développement en Afrique du Nord. Elles démontrent qu'une approche intégrée, combinant investissements dans les infrastructures numériques et énergétiques, renforcement institutionnel et coopération régionale, est indispensable pour répondre aux défis contemporains et favoriser une croissance inclusive et durable dans la région.

## **5. Conclusion**

La présente étude a permis d'explorer en profondeur les interactions complexes entre digitalisation, consommation énergétique et croissance économique dans les pays d'Afrique du Nord, en adoptant une approche intégrée orientée vers le développement durable. Grâce à l'application de modèles économétriques à données de panel de deuxième génération, en particulier le modèle CS-ARDL, notre analyse a révélé que la digitalisation et la transition énergétique agissent comme des leviers de transformation, mais que leurs impacts sont fortement modulés par des spécificités nationales et régionales. Les résultats obtenus mettent en exergue le rôle stratégique des investissements dans les infrastructures numériques et l'intégration progressive des énergies renouvelables, qui stimulent la croissance économique tout en améliorant la qualité environnementale.

À court terme, les effets des investissements en capital fixe et la persistance d'une dépendance aux énergies non renouvelables illustrent l'importance de soutenir l'activité économique

immédiate, bien que ces mécanismes engendrent des pressions sur l'environnement et posent des défis en matière de durabilité. À long terme, l'analyse démontre que l'adoption accrue des énergies renouvelables, associée à un renforcement de la digitalisation, peut générer des effets positifs structurants, favorisant ainsi une réduction des émissions de carbone et une amélioration de l'efficacité économique. Ces constats soulignent la nécessité d'une révision du mix énergétique et d'un déploiement soutenu des technologies numériques pour soutenir une croissance inclusive et résiliente.

Cependant, cette recherche présente certaines limites. La variabilité des données entre les pays et la difficulté de mesurer précisément certains indicateurs de digitalisation et de transition énergétique imposent une prudence dans l'interprétation des résultats. De plus, bien que le modèle CS-ARDL permette d'intégrer les dynamiques à court et à long terme, la complexité structurelle des économies nord-africaines suggère que d'autres variables, telles que les facteurs institutionnels et éducatifs, pourraient être intégrées pour affiner l'analyse. Il serait ainsi pertinent que de futures recherches explorent l'impact de ces dimensions supplémentaires, ainsi que l'évolution des interactions dans un contexte de changement technologique rapide et de transition énergétique accélérée.

Par ailleurs, la généralisation des résultats à l'ensemble des économies nord-africaines reste à confirmer, ce qui ouvre la voie à des études comparatives avec d'autres régions confrontées à des défis similaires. Les orientations futures pourraient également inclure l'utilisation de techniques de modélisation non linéaire et l'examen des effets asymétriques pour mieux saisir les réponses différenciées des économies aux chocs exogènes, qu'ils soient technologiques ou énergétiques.

L'ensemble de ces éléments offre des pistes de réflexion essentielles pour l'élaboration de politiques publiques coordonnées. L'intégration harmonieuse de la digitalisation et de la transition énergétique, soutenue par des investissements stratégiques dans l'éducation, l'innovation et la modernisation des infrastructures, semble être une voie prometteuse pour répondre aux défis actuels et futurs en matière de développement durable dans la région nord-africaine.

## 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>

Alariqi, M., Long, W., Singh, P. R., Al-Barakani, A., & Muazu, A. (2023). Modelling dynamic links among energy transition, technological level and economic development from the perspective of economic globalisation: Evidence from MENA economies. *Energy Reports*, 9, 3920–3931. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.02.089>

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>

Baltagi, B. H. (Ed.). (2015). *The Oxford handbook of panel data*. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199940042.001.0001>

Becha, H., Kalai, M., Houidi, S., & Helali, K. (2023). The symmetric and asymmetric effects of digitalization on economic growth in African countries: Evidence from linear and non-linear ARDL models. In *Digital economy. Emerging technologies and business innovation* (pp. 315–345). [https://doi.org/10.1007/978-3-031-42788-6\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-031-42788-6_20)

- Benali, M., & Benabbou, L. (2023). Carbon emissions, energy consumption, and economic growth in Morocco. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 13(4), 61–67. <https://doi.org/10.32479/ijeeep.14336>
- 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>
- Blimpo, M. P., Dato, P., Mukhaya, B., & Odarno, L. (2024). Climate change and economic development in Africa: A systematic review of energy transition modeling research. *Energy Policy*, 187, 114044. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114044>
- Charfeddine, L., Hussain, B., & Kahia, M. (2024). Analysis of the impact of information and communication technology, digitalization, renewable energy and financial development on environmental sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 201, 114609. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114609>
- Chen, P. Y., Chen, S. T., Hsu, C. S., & Chen, C. C. (2016). Modeling the global relationships among economic growth, energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 420–431. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.074>
- Chi, Y., Esily, R. R., Ibrahiem, D. M., Houssam, N., Chen, Y., Jia, X., & Zhang, X. (2023). Is North Africa region on track to energy trilemma for enhancing economic progress? The role of population growth and energy usage. *Energy Strategy Reviews*, 50, 101245. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101245>
- 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](https://doi.org/10.1162/rest_a_00593)
- 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>
- 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>
- 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>
- Islam, Md. M., Sohag, K., Hammoudeh, S., Mariev, O., & Samargandi, N. (2022). Minerals import demands and clean energy transitions: A disaggregated analysis. *Energy Economics*, 113, 106205. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106205>
- Kraft, J., & Kraft, A. (1978). On the relationship between energy and GNP. *Journal of Energy and Development*, 3(2), 401–403.
- Le, T.-H., & Quah, E. (2018). Income level and the emissions, energy, and growth nexus: Evidence from Asia and the Pacific. *International Economics*, 156, 193–205. <https://doi.org/10.1016/j.inteco.2018.03.002>
- Lee, C.-C., Fang, Y., Quan, S., & Li, X. (2024). Leveraging the power of artificial intelligence toward the energy transition: The key role of the digital economy. *Energy Economics*, 135, 107654. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107654>
- Mankiw, N. G., Romer, D., & Weil, D. (1992). A contribution to the empirics of economic growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 107(2), 407–437. <https://doi.org/10.2307/2118477>
- 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>
- 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>
- Sarsar, L., & Echaoui, A. (2024). Empirical analysis of the economic complexity boost on the impact of energy transition on economic growth: A panel data study of 124 countries. *Energy*, 294, 130712. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130712>
- 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>
- Solow, R. M. (1956). A contribution to the theory of economic growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65–94. <https://doi.org/10.2307/1884513>
- Ullah, A., Nobanee, H., Ullah, S., & Iftikhar, 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>
- US Energy Information Administration [EIA]. (2025). US Energy Information Administration: EIA energy data. Retrieved from <https://www.eia.gov/international/data/world>. Accessed 09 January 2025.
- World Development Indicators [WDI]. (2025). World Bank: World Development Indicators. Retrieved from <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>. Accessed 09 January 2025.
- 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>
- Yahyaoui, I. (2024). Does the interaction between ICT diffusion and economic growth reduce CO<sub>2</sub> emissions? An ARDL approach. *Journal of the Knowledge Economy*, 15(1), 661–681. <https://doi.org/10.1007/s13132-022-01090-y>