

**Émissions de dioxyde de carbone, investissements directs
étrangers et énergies renouvelables : nouvelles perspectives en
Afrique du Nord**

**Carbon Dioxide Emissions, Foreign Direct Investment and
Renewable Energy: New Evidence from North Africa**

EL MERZEME AYOUB

Doctorant chercheur

Faculté des Sciences Juridiques, Economiques et Sociales - Souissi

Université Mohamed V Rabat

Laboratoire Analyse Économique et Modélisation

Maroc

AJBABDI Ikram

Doctorante chercheuse

Faculté d'Economie et Gestion - Guelmim

Université Ibn Zohr

Laboratoire de Recherche en Management, Innovation et Recherche Appliquée

Maroc

Anouar GHAZI

Enseignant chercheur

Faculté des Sciences Juridiques, Economiques et Sociales - Souissi

Université Mohamed V Rabat

Laboratoire Analyse Économique et Modélisation

Maroc

Date de soumission : 30/08/2026

Date d'acceptation : 30/09/2026

Pour citer cet article :

EL MERZEME. A. & al. (2026) « Émissions de dioxyde de carbone, investissements directs étrangers et énergies renouvelables : nouvelles perspectives en Afrique du Nord », Revue Française d'Économie et de Gestion « Volume 7 : Numéro 10 » pp : 359- 376.

Author(s) agree that this article remain permanently open access under the terms of the Creative Commons

Attribution License 4.0 International License



Résumé

Cette étude examine la relation entre les émissions de dioxyde de carbone, les investissements directs étrangers et la consommation d'énergies renouvelables en Afrique du Nord. Elle porte sur un panel de six pays (Maroc, Algérie, Tunisie, Mauritanie, Libye et Égypte) observés annuellement de 2000 à 2022, à partir des Indicateurs du développement dans le monde de la Banque mondiale. La relation est estimée au moyen d'un modèle de panel à effets fixes. Les résultats montrent que les investissements directs étrangers et la densité de population sont associés à une hausse des émissions de dioxyde de carbone, tandis que la consommation d'énergies renouvelables leur est associée négativement. L'effet du produit intérieur brut par habitant n'est pas statistiquement significatif dans la spécification retenue.

Mots clés : investissements directs étrangers ; émissions de dioxyde de carbone ; énergies renouvelables ; données de panel ; Afrique du Nord.

Classification JEL : F21 ; O55 ; Q43 ; Q56 ; C23.

Type de l'article : Recherche appliquée.

Abstract

This study examines the relationship between carbon dioxide emissions, foreign direct investment and renewable energy consumption in North Africa. It covers a panel of six countries (Morocco, Algeria, Tunisia, Mauritania, Libya and Egypt) observed annually from 2000 to 2022, using the World Bank World Development Indicators. The relationship is estimated with a fixed-effects panel model. The results show that foreign direct investment and population density are associated with higher carbon dioxide emissions, whereas renewable energy consumption is negatively associated with them. The effect of GDP per capita is not statistically significant in the retained specification.

Keywords : foreign direct investment; carbon dioxide emissions; renewable energy; panel data; North Africa.

JEL Classification : F21; O55; Q43; Q56; C23.

Paper type : Empirical research.

Introduction

Le changement climatique s'est imposé comme l'un des principaux problèmes économiques mondiaux, et la trajectoire des émissions reste éloignée des engagements pris. Selon l'Agence internationale de l'énergie, les émissions mondiales de dioxyde de carbone liées à l'énergie ont atteint un niveau record de 37,4 gigatonnes en 2023, en progression de 1,1 %, soit 410 millions de tonnes supplémentaires par rapport à 2022 (IEA, 2024). Le déploiement des technologies propres a certes freiné cette progression, mais il ne l'a pas inversée. Dans ce contexte, la question des canaux par lesquels l'ouverture économique et l'investissement international agissent sur la qualité de l'environnement reste ouverte, en particulier pour les économies en développement dont les besoins énergétiques croissent rapidement.

Sur le plan théorique, deux lectures opposées structurent la littérature. La première remonte à Walter et Ugelow (1979), qui observent que les politiques environnementales des pays en développement demeurent comparativement permissives et peuvent, de ce fait, se transformer en avantage comparatif dans les activités polluantes. Copeland et Taylor (1994) formalisent cette intuition dans un modèle d'équilibre général du commerce Nord-Sud : le pays à revenu élevé choisit une protection environnementale plus stricte et se spécialise dans les biens propres, tandis que le pays à faible revenu accueille les productions les plus polluantes. C'est l'hypothèse du havre de pollution. La seconde lecture, dite du halo de pollution, soutient au contraire que les firmes multinationales diffusent des technologies plus économes et des pratiques de gestion plus exigeantes que celles des entreprises locales. Eskeland et Harrison (2003), à partir de données d'établissements de Côte d'Ivoire, du Mexique, du Maroc et du Venezuela, ne trouvent qu'une preuve faible de la concentration des investisseurs étrangers dans les secteurs polluants, mais montrent que les établissements sous contrôle étranger sont significativement plus efficaces sur le plan énergétique et recourent à des sources d'énergie plus propres. Ces deux mécanismes s'articulent par ailleurs à la relation en cloche entre revenu par habitant et dégradation environnementale mise en évidence par Grossman et Krueger (1995).

Les travaux empiriques n'ont pas tranché ce débat. Talukdar et Meisner (2001), sur 44 pays en développement observés de 1987 à 1995, associent une participation accrue du secteur privé à de moindres émissions industrielles de dioxyde de carbone. Omri, Nguyen et Rault (2014), à partir de modèles à équations simultanées dynamiques appliqués à 54 pays sur la période 1990-2011, mettent en évidence une causalité bidirectionnelle entre émissions de dioxyde de carbone et flux entrants d'investissements directs étrangers, ce qui invalide toute lecture strictement unidirectionnelle. Paramati, Mo et Gupta (2017), sur les pays du G20 de 1991 à 2012, montrent

que la consommation d'énergies renouvelables réduit significativement les émissions de CO₂ et soutient la production, tandis que les flux d'IDE sont également associés à une baisse des émissions dans l'échantillon global et dans les économies en développement.

L'Afrique du Nord constitue un terrain particulièrement pertinent pour reprendre cette question, et cela pour trois raisons. D'abord, la région combine une forte dépendance aux hydrocarbures, une croissance démographique et urbaine soutenue et un potentiel solaire et éolien parmi les plus élevés au monde. Ensuite, les politiques publiques y ont explicitement fait de l'investissement étranger un instrument de la transition énergétique : le Maroc a ainsi annoncé lors de la COP21 un objectif de 52 % de capacité électrique installée d'origine renouvelable à l'horizon 2030, réparti entre 20 % de solaire, 20 % d'éolien et 12 % d'hydraulique (IEA, 2019). Enfin, les travaux disponibles raisonnent le plus souvent à l'échelle de la région Moyen-Orient et Afrique du Nord. Shahbaz, Balsalobre-Lorente et Sinha (2019) valident ainsi l'hypothèse du havre de pollution sur un panel MENA de 1990 à 2015 par la méthode des moments généralisés, et mettent en évidence une relation en N entre investissements directs étrangers et émissions. Or l'agrégat MENA réunit des exportateurs d'hydrocarbures du Golfe et des économies nord-africaines dont les structures productives, les niveaux de revenu et les régimes réglementaires diffèrent sensiblement, ce qui rend l'inférence régionale fragile.

L'objectif de cet article est d'étudier la relation entre les émissions de dioxyde de carbone, les investissements directs étrangers et la consommation d'énergies renouvelables en Afrique du Nord sur la période 2000-2022, en mobilisant une modélisation en données de panel. Il cherche à déterminer dans quelle mesure les investissements directs étrangers agissent comme un facteur de dégradation ou, au contraire, comme un vecteur de diffusion des technologies propres.

L'article apporte quatre contributions. Sur le plan théorique, il confronte directement les hypothèses concurrentes du havre et du halo de pollution sur un espace régional homogène, alors que la littérature les teste le plus souvent sur des panels hétérogènes. Sur le plan méthodologique, il introduit conjointement l'investissement direct étranger et la consommation d'énergies renouvelables dans une même spécification, ce qui permet de distinguer l'effet d'échelle de l'effet de composition énergétique, et il retient la spécification retenue à l'issue d'une séquence explicite de tests (poolabilité, multiplicateur de Lagrange de Honda, Hausman) plutôt que de l'imposer a priori. Sur le plan régional, il restreint l'analyse aux six pays d'Afrique du Nord, ce qui limite l'hétérogénéité non observée par rapport aux panels MENA usuels. Sur

le plan temporel enfin, la période 2000-2022 couvre à la fois la montée en puissance des stratégies solaires nationales, la période post-Accord de Paris et le choc de la pandémie.

Le reste de l'article est organisé comme suit. La première section présente la revue de littérature. La deuxième expose la méthodologie et les données. La troisième présente et discute les résultats. La conclusion en tire les implications.

1. Revue de littérature

1.1. Cadre théorique : havre de pollution et halo de pollution

Si la dégradation de l'environnement mobilise autant les économistes, c'est en raison de ce qu'elle engage : la soutenabilité du développement, le rythme de la croissance et les conditions de vie des populations. L'énergie a porté l'essor industriel des deux derniers siècles, mais le recours massif aux combustibles fossiles se paie d'une détérioration des milieux naturels. Les gaz à effet de serre accumulés dans l'atmosphère, au premier rang desquels le dioxyde de carbone, réchauffent le système climatique et entraînent d'autres conséquences, du recul du couvert forestier à la montée du niveau des océans.

La relation entre les investissements directs étrangers et la pollution environnementale est habituellement lue à travers deux hypothèses concurrentes.

Selon l'hypothèse du havre de pollution, les firmes multinationales déplaceraient leurs segments les plus polluants vers des juridictions où la contrainte environnementale est plus lâche, ou moins coûteuse à satisfaire. Ces territoires, en développement pour la plupart, tireraient de la faiblesse de leurs normes un argument d'attractivité pour les investissements directs étrangers. Formulée par Walter et Ugelow (1979) à partir du constat de règles peu exigeantes au Sud, l'intuition reçoit sa forme analytique chez Copeland et Taylor (1994), dont le modèle Nord-Sud conduit l'économie à bas revenu à se spécialiser dans les productions à forte intensité polluante. Le résultat attendu est une détérioration de la qualité environnementale chez le pays d'accueil. L'hypothèse du halo de pollution suggère à l'inverse que les investissements directs étrangers peuvent améliorer la qualité environnementale du pays hôte. Selon cette lecture, les entreprises multinationales apportent des technologies plus avancées, des pratiques de gestion durable et des standards environnementaux plus élevés que ceux des firmes locales, contribuant ainsi à réduire la pollution. Eskeland et Harrison (2003) en fournissent l'appui empirique le plus cité : sur des données d'établissements de Côte d'Ivoire, du Mexique, du Maroc et du Venezuela, ils montrent que les établissements sous contrôle étranger sont significativement plus efficaces sur le plan énergétique et utilisent des énergies plus propres, la concentration des investisseurs étrangers dans les secteurs polluants n'apparaissant quant à elle que faiblement étayée.

Ces deux hypothèses ne sont pas exclusives l'une de l'autre. Elles renvoient à des effets de composition et de technique qui peuvent jouer en sens contraire, et dont la résultante dépend du niveau de revenu, conformément à la relation en cloche entre revenu par habitant et dégradation environnementale documentée par Grossman et Krueger (1995).

1.2. Investissements directs étrangers et émissions de dioxyde de carbone

Les travaux empiriques consacrés à l'incidence environnementale des investissements directs étrangers sont nombreux, et leurs conclusions varient selon les régions et les configurations économiques retenues. Talukdar et Meisner (2001) mesurent, sur 44 économies en développement entre 1987 et 1995, l'incidence de la participation privée sur les rejets industriels de dioxyde de carbone, en tenant sous contrôle le niveau des investissements étrangers ; le bilan qu'ils dressent est favorable à la qualité de l'air. Eskeland et Harrison (2003) confrontent quant à eux les coûts de réduction de la pollution aux caractéristiques des implantations étrangères au Mexique, au Maroc, en Côte d'Ivoire et au Venezuela, et concluent à une intensité polluante moindre chez les firmes étrangères que chez les producteurs locaux, ce qui plaide pour le halo de pollution.

Sur données mexicaines, Waldkirch et Gopinath (2008) rapprochent l'intensité polluante de la production des implantations étrangères. L'examen de plusieurs polluants les conduit à valider le havre de pollution pour ce pays, les activités étrangères y bénéficiant d'un encadrement environnemental peu contraignant.

MacDermott (2009) reprend la même hypothèse au moyen d'un modèle de gravité et retrouve une orientation des localisations productives vers les juridictions dont la réglementation environnementale est la moins exigeante.

Pour l'Inde, Acharyya (2009) met en balance les coûts et les bénéfices des investissements étrangers sur la période 1980-2003. À long terme, l'effet estimé sur les émissions de dioxyde de carbone est positif et significatif, la croissance du produit intérieur brut servant de courroie de transmission ; les flux entrants auraient de la sorte pesé sur la qualité de l'air indienne.

Omri, Nguyen et Rault (2014) mobilisent des modèles à équations simultanées dynamiques sur un panel global de 54 pays entre 1990 et 2011 et mettent en évidence une causalité bidirectionnelle entre les émissions de dioxyde de carbone et les flux entrants d'investissements directs étrangers. Ce résultat est important sur le plan méthodologique : il indique que la relation ne peut être présumée unidirectionnelle et invite à la prudence dans l'interprétation causale des estimations en panel statique.

Shahbaz, Balsalobre-Lorente et Sinha (2019) traitent la zone Moyen-Orient et Afrique du Nord sur 1990-2015, en intégrant la biomasse au bilan énergétique. Leur estimation par la méthode des moments généralisés confirme le havre de pollution et fait apparaître une forme en N entre flux entrants et émissions de carbone.

To et al. (2019) portent l'examen sur les marchés émergents d'Asie entre 1980 et 2016 : l'effet estimé des implantations étrangères sur les émissions y est nettement positif, ce qui accrédite là encore l'hypothèse du havre.

Amoah, Alagidede et Sare (2023) traitent le cas de l'Afrique subsaharienne en faisant de l'industrialisation et de l'ouverture commerciale des canaux de médiation et de modération ; la relation qu'ils obtiennent entre flux entrants et émissions de carbone est positive.

1.3. Investissements directs étrangers et énergies renouvelables

Un courant en expansion s'attache au lien entre investissements étrangers et énergies renouvelables, ainsi qu'à sa portée pour la croissance et pour les performances environnementales.

Appiah-Otoo, Chen et Ampah (2023) testent le rôle modérateur des investissements étrangers dans le couple renouvelables-croissance, sur quinze pays ouest-africains entre 1990 et 2021. Erreurs standard corrigées pour données de panel et moindres carrés généralisés réalisables les conduisent à un double constat : les flux entrants tirent la consommation d'énergie renouvelable et soutiennent l'activité régionale.

En Asie du Sud, Chowdhury et Chowdhury (2022) examinent le triptyque renouvelables, investissements étrangers et croissance. Effets aléatoires et moments généralisés font ressortir une contribution positive et significative des deux premiers termes à la croissance ; l'étude relève cependant que les flux entrants compriment la consommation d'énergie renouvelable, que le progrès économique soutient au contraire.

Grabara et al. (2021) se placent au Kazakhstan et en Ouzbékistan sur 1992-2018. Causalité de Granger et cointégration de Johansen leur livrent un lien à double sens entre flux entrants et renouvelables, doublé d'une relation de longue période. Ils notent toutefois que la concentration des investissements dans les mines, le pétrole et le gaz en bride la portée favorable, ce qui renvoie à la question de la composition sectorielle.

Kilicarslan (2019) traite le long terme entre investissements étrangers et production d'électricité renouvelable pour les BRICS et la Turquie sur 1996-2015. Cointégration de Pedroni et modèle autorégressif à retards échelonnés livrent une contribution positive des flux entrants, d'où la recommandation d'incitations publiques ciblées sur le secteur.

Uzar et Eyuboglu (2019) travaillent sur la Turquie entre 1980 et 2015, avec des tests de Fourier ADL et une approche à retards échelonnés. Les quatre séries retenues, consommation d'énergie, investissements étrangers, croissance et ouverture commerciale, sont cointégrées ; l'activité comme l'ouverture soutiennent durablement la consommation énergétique.

Xie et Liu (2019) s'intéressent aux non-linéarités combinées de la croissance et de l'urbanisation dans les émissions chinoises, au moyen d'un modèle additif partiellement linéaire sur données de panel. L'incidence des variables d'échelle y dépend du niveau déjà atteint par les émissions.

Xu et al. (2021) relient investissements étrangers et rejets de dioxyde de soufre en régime de transition énergétique, par traitement semi-paramétrique du cadre STIRPAT appliqué à des données régionales chinoises pour 2002-2016 ; la structure du bouquet énergétique y apparaît décisive dans l'arbitrage entre havre et halo.

Caglar (2020) considère les neuf pays les mieux placés au classement de performance climatique, dont le Maroc, et croise renouvelables, énergies fossiles, investissements étrangers, croissance et émissions de carbone au moyen d'une approche à retards échelonnés avec bootstrap. Peu de relations de cointégration ressortent, mais des liens de longue période apparaissent dans certains pays. La place du Maroc y demeure marginale : il est traité isolément, sans mise en perspective régionale.

Ahmadi (2024) porte sur 38 pays entre 2001 et 2020 l'examen des effets des investissements étrangers et de l'approfondissement financier sur la demande d'énergie renouvelable. Des méthodes de deuxième génération, sensibles à la dépendance transversale et aux ruptures structurelles, établissent la cointégration et font apparaître des profils en U, les effets d'échelle se trouvant progressivement compensés par les canaux technologique et de composition.

Mert et Bölük (2016) estiment, sur les pays de l'annexe du Protocole de Kyoto, un modèle à retards échelonnés en panel où figurent investissements étrangers et renouvelables. Leurs conclusions vont dans le sens du halo, le recours aux énergies propres abaissant les émissions de carbone.

Onifade et al. (2021) examinent le basculement des sources conventionnelles vers les sources propres en Turquie et dans les pays caspiens, et concluent au caractère globalement défavorable du recours aux combustibles fossiles, d'où l'urgence d'une transition accélérée.

Doytch et Narayan (2016) décomposent par branches les investissements étrangers de 74 pays entre 1985 et 2012. Un estimateur dynamique de type Blundell-Bond fait apparaître un repli de la consommation d'énergies non renouvelables et un soutien aux renouvelables, avec des écarts sensibles selon les secteurs.

Naz et al. (2019) traitent le Pakistan sur 1975-2016 et attribuent aux renouvelables, aux flux entrants et à la croissance des rôles de médiation et de modération dans la formation des émissions, au moyen d'un estimateur robuste des moindres carrés. Croissance et investissements étrangers alourdissent les émissions, que les renouvelables allègent significativement. Leurs estimations ne valident pas la courbe environnementale de Kuznets et vont dans le sens du havre de pollution.

Paramati, Mo et Gupta (2017), enfin, montrent sur les pays du G20 entre 1991 et 2012 que la consommation d'énergie renouvelable réduit les émissions de dioxyde de carbone tout en soutenant la production, ce qui appuie l'idée que la composition du mix énergétique constitue un canal distinct de l'effet d'échelle.

1.4. Approches méthodologiques et positionnement de l'étude

Sur le plan méthodologique, la littérature recourt principalement à trois familles d'approches. La première repose sur les modèles autorégressifs à retards échelonnés et les tests de cointégration, mobilisés lorsque la dimension temporelle est longue et la dimension individuelle réduite (Kilicarslan, 2019 ; Mert et Bölük, 2016 ; Caglar, 2020). La deuxième repose sur les estimateurs de panel dynamiques et la méthode des moments généralisés, retenus pour traiter l'endogénéité et la causalité inverse (Omri et al., 2014 ; Shahbaz et al., 2019 ; Doytch et Narayan, 2016). La troisième repose sur les modèles de panel statiques à effets fixes ou aléatoires, adaptés aux panels courts en dimension temporelle et fortement hétérogènes en dimension individuelle (Talukdar et Meisner, 2001).

Deux constats se dégagent de cette revue. D'une part, la relation entre investissements directs étrangers et émissions de dioxyde de carbone reste indéterminée : le sens et l'ampleur de l'effet dépendent de la composition sectorielle des flux, du régime réglementaire et du niveau de revenu. D'autre part, l'Afrique du Nord n'a pas été traitée comme un ensemble propre : elle est le plus souvent diluée dans des agrégats MENA (Shahbaz et al., 2019) ou africains (Amoah et al., 2023), alors même que ses six économies présentent des structures énergétiques et des trajectoires d'investissement distinctes de celles des exportateurs d'hydrocarbures du Golfe.

La présente étude s'inscrit dans cet espace. Compte tenu de la longueur limitée des séries disponibles auprès des observatoires nationaux nord-africains et de la nécessité de disposer d'un nombre suffisant d'observations, le recours à une modélisation en données de panel s'impose : il permet de combiner l'information transversale et temporelle et de contrôler l'hétérogénéité inobservée propre à chaque pays.

2. Méthodologie

2.1. Données et variables

Cette étude porte sur la relation entre les investissements directs étrangers, les émissions de dioxyde de carbone et les énergies renouvelables en Afrique du Nord sur la période 2000-2022. Les données sont issues des Indicateurs du développement dans le monde de la Banque mondiale. Elles couvrent six pays d'Afrique du Nord (Maroc, Algérie, Tunisie, Mauritanie, Égypte et Libye) sur une base annuelle de 2000 à 2022, soit 138 observations. La variable dépendante est constituée des émissions de dioxyde de carbone. Les variables explicatives retenues sont le produit intérieur brut par habitant, la densité de population, les investissements directs étrangers et la consommation d'énergies renouvelables. Les variables strictement positives (émissions de CO₂, produit intérieur brut par habitant, densité de population) sont introduites en logarithme, de sorte que les coefficients associés s'interprètent comme des élasticités. Les investissements directs étrangers et la part des énergies renouvelables présentent en revanche des valeurs négatives pour certaines observations (minima respectifs de -8,84 % et -1,00 %, cf. tableau 1), pour lesquelles le logarithme n'est pas défini ; ces deux variables sont donc introduites en niveau (en pourcentage), et les coefficients qui leur sont associés s'interprètent comme des semi-élasticités.

Tableau N°1 : Statistiques descriptives

Variable	Unité	Obs.	Moyenne	Écart type	Minimum	Maximum
CO2	Millions de tonnes	138	79,96	73,92	1,09	269,31
PIB	US \$ constants par habitant	138	3 948,97	2 893,67	629,78	15 765,42
IDE	% du PIB	138	1,97	2,35	-8,84	109,76
CER	% de la consommation finale	138	11,46	11,22	-1,00	44,40
POD	Habitants par km ²	138	43,03	36,88	2,61	109,76

Source : élaboré par les auteurs à partir des Indicateurs du développement dans le monde (Banque mondiale).

Les statistiques descriptives font apparaître une forte hétérogénéité entre les pays du panel. L'investissement direct étranger représente en moyenne 1,97 % du produit intérieur brut, avec un minimum négatif traduisant des épisodes de désinvestissement. Les émissions de dioxyde de carbone présentent une dispersion considérable, d'un minimum de 1,09 million de tonnes à un maximum de 269,31 millions de tonnes, ce qui reflète l'écart de taille entre la Mauritanie et l'Égypte. Le produit intérieur brut par habitant s'établit en moyenne à 3 948,97 dollars constants,

dans un intervalle allant de 629,78 à 15 765,42 dollars. La densité de population moyenne est de 43,03 habitants par kilomètre carré. La part des énergies renouvelables dans la consommation finale s'élève en moyenne à 11,46 %. Cette hétérogénéité justifie à elle seule le recours à une spécification autorisant des effets individuels.

2.2. Spécification du modèle

L'économétrie des données de panel occupe une place centrale dans les travaux empiriques en économie. Elle mobilise des données à deux dimensions : pour chaque observation d'une variable, un premier indice caractérise l'individu et un second la période.

La spécification la plus répandue dans la littérature repose sur un modèle à erreurs composées:

$$Y_{it} = X_{it} \beta + u_{it} \quad \text{avec } i = 1, \dots, N ; t = 1, \dots, T \text{ et } u_{it} = a_i + \varepsilon_{it}$$

où a_i capte l'effet spécifique à l'individu i et ε_{it} le terme d'erreur idiosyncratique, d'espérance nulle. Dans sa version la plus simple, ce modèle suppose l'homogénéité des comportements, un même vecteur de paramètres s'appliquant à tous les individus et à toutes les périodes (Dormont, 1989). L'intérêt de cette modélisation est qu'elle permet d'exploiter simultanément la variabilité en coupe et la variabilité temporelle, et de contrôler l'hétérogénéité inobservée invariante dans le temps propre à chaque pays.

Nous examinons l'effet des investissements directs étrangers et des énergies renouvelables sur les émissions de dioxyde de carbone à partir de la relation suivante :

$$CO2_{it} = f (IDE_{it}, PIB_{it}, CER_{it}, POD_{it})$$

qui s'écrit, sous forme logarithmique et une fois les effets individuels introduits :

$$\ln CO2_{it} = \alpha_i + \beta_1 IDE_{it} + \beta_2 \ln PIB_{it} + \beta_3 CER_{it} + \beta_4 \ln POD_{it} + \varepsilon_{it}$$

avec :

$CO2_{it}$: émissions de dioxyde de carbone, variable dépendante, exprimées en millions de tonnes ;

IDE_{it} : flux entrants d'investissements directs étrangers, exprimés en pourcentage du produit intérieur brut ;

PIB_{it} : produit intérieur brut par habitant, en dollars américains constants ;

CER_{it} : consommation d'énergies renouvelables, en pourcentage de la consommation finale d'énergie ;

POD_{it} : densité de population, en nombre d'habitants par kilomètre carré.

Le choix de la spécification n'est pas imposé a priori. Il résulte d'une séquence de tests : un test de poolabilité, deux tests du multiplicateur de Lagrange de Honda portant respectivement sur les effets individuels et sur les effets temporels, puis un test de Hausman arbitrant entre effets

fixes et effets aléatoires. Les estimations ont été réalisées sous R au moyen du package plm (le code est reproduit en annexe).

3. Résultats et discussion

3.1. Test de poolabilité

Le test de poolabilité vérifie si les coefficients du modèle peuvent être considérés comme identiques pour l'ensemble des pays du panel. Il oppose l'hypothèse nulle d'un modèle entièrement empilé, dans lequel un même vecteur de paramètres s'applique à tous les pays, à l'hypothèse alternative d'une hétérogénéité des comportements.

Hypothèse nulle (H_0) : un modèle empilé estimé par les moindres carrés ordinaires est suffisant.

Hypothèse alternative (H_1) : une spécification tenant compte de l'hétérogénéité individuelle est préférable.

Tableau N°2 : Test de poolabilité

Test	Statistique	Degrés de liberté	p-value
Test F de poolabilité	F = 12,836	df1 = 20 ; df2 = 108	< 2,2e-16

Source : élaboré par les auteurs à partir des sorties du logiciel R.

La statistique de test s'établit à 12,836 pour une p-value inférieure à 2,2e-16. L'hypothèse nulle est donc rejetée : les comportements ne sont pas homogènes d'un pays à l'autre, ce qui justifie le recours à une spécification autorisant des effets individuels plutôt qu'à un modèle empilé.

3.2. Test du multiplicateur de Lagrange de Honda : effets individuels

Tableau N°3 : Test de la présence d'effets individuels

Test	Modèle testé	Statistique	p-value
Multiplicateur de Lagrange (Honda)	$\ln CO_2 = \ln IDE + \ln PIB + \ln CER + \ln POD$	Normale = 30,706	< 2,2e-16

Source : élaboré par les auteurs à partir des sorties du logiciel R.

Le test du multiplicateur de Lagrange de Honda est appliqué pour examiner la présence d'effets individuels dans la structure du panel. La statistique normale associée est de 30,706, pour une probabilité très inférieure à 5 %. L'hypothèse nulle d'absence d'effets individuels est rejetée : les spécificités propres à chaque pays exercent un effet significatif sur les émissions.

3.3. Test du multiplicateur de Lagrange de Honda : effets temporels

Tableau N°4 : Test de la présence d'effets temporels

Test	Modèle testé	Statistique	p-value
Multiplicateur de Lagrange (Honda), effets temporels	$\ln CO_2 = \ln IDE + \ln PIB + \ln CER + \ln POD$	Normale = -1,6411	0,9496

Source : élaboré par les auteurs à partir des sorties du logiciel R.

Le même test est ensuite appliqué à la dimension temporelle. La probabilité associée, égale à 0,9496, est très supérieure à 0,05 : l'hypothèse nulle d'absence d'effets temporels ne peut être rejetée. L'hétérogénéité du panel provient donc de la dimension individuelle et non de la dimension temporelle, ce qui conduit à retenir un modèle à effets individuels.

3.4. Estimation du modèle

Tableau N°5 : Estimations du modèle (variable dépendante : lnCO2)

Variable	MCO empilé	MEFI	MEFT	MEFIT
lnPIB	0,358*** (0,098)	0,047 (0,033)	0,462*** (0,113)	0,002 (0,051)
CER	-0,568*** (0,038)	-0,187*** (0,031)	-0,561*** (0,040)	-0,203*** (0,032)
IDE	0,193*** (0,039)	0,016** (0,007)	0,233*** (0,044)	0,018** (0,008)
lnPOD	0,679*** (0,036)	1,598*** (0,111)	0,700*** (0,038)	1,916*** (0,216)
Constante	0,039 (0,379)	—	—	—
Observations	138	138	138	138
R²	0,845	0,896	0,860	0,686
R² ajusté	0,841	0,888	0,828	0,594
Statistique F	274,458***	170,937***	57,814***	181,520***

*Notes : écarts types entre parenthèses. *** $p < 0,01$; ** $p < 0,05$; * $p < 0,10$. MCO empilé : moindres carrés ordinaires sur données empilées. MEFI : modèle à effets fixes individuels. MEFT : modèle à effets fixes temporels. MEFIT : modèle à effets fixes bidirectionnels.*

Source : élaboré par les auteurs à partir des sorties du logiciel R.

Les tests précédents conduisent à retenir le modèle à effets fixes individuels (MEFI), dont les résultats sont commentés ci-après. Les trois autres colonnes sont reportées à titre de comparaison et de contrôle de robustesse.

Le coefficient du produit intérieur brut par habitant est positif mais n'est pas statistiquement significatif dans la spécification retenue. Ce résultat mérite d'être souligné : l'effet du revenu apparaît nettement significatif dans le modèle empilé (0,358) et dans le modèle à effets temporels (0,462), mais s'annule dès lors que l'hétérogénéité individuelle est contrôlée. Cela suggère que la corrélation apparente entre revenu et émissions traduit pour l'essentiel des différences structurelles entre pays plutôt qu'une relation intertemporelle au sein de chaque pays. Une lecture prudente consiste donc à ne pas conclure, sur ces données, à un effet d'échelle du revenu sur les émissions.

Le coefficient des investissements directs étrangers est positif et significatif au seuil de 5 % : les IDE étant introduits en niveau (cf. section 2.1), une augmentation d'un point de pourcentage

des flux entrants d'investissements directs étrangers (en % du PIB) est associée à une hausse de 0,016 % des émissions de dioxyde de carbone. Ce résultat est cohérent avec l'hypothèse du havre de pollution et rejoint les conclusions obtenues par Shahbaz et al. (2019) sur la région MENA et par To et al. (2019) sur les marchés émergents asiatiques. L'ampleur de l'élasticité reste toutefois faible, ce qui invite à considérer que l'effet du capital étranger sur les émissions passe davantage par la composition sectorielle des flux que par leur volume.

La densité de population exerce l'effet le plus marqué : une augmentation de 1 % de la densité est associée à une hausse de 1,598 % des émissions. Cet effet s'explique principalement par la demande accumulée de la population en biens et en services, notamment en énergie, en transport et en logement, dont la satisfaction accroît les émissions de dioxyde de carbone.

La consommation d'énergies renouvelables est associée négativement aux émissions : la part des énergies renouvelables étant elle aussi introduite en niveau (cf. section 2.1), une augmentation d'un point de pourcentage de la part des renouvelables dans la consommation finale s'accompagne d'une baisse de 0,187 % des émissions de dioxyde de carbone. Ce résultat converge avec ceux de Paramati et al. (2017) sur les pays du G20, de Mert et Bölük (2016) et de Naz et al. (2019). Il rejoint également les conclusions d'Onifade et al. (2021) selon lesquelles la transition des combustibles fossiles vers les énergies propres est susceptible d'atténuer l'effet de havre de pollution associé aux investissements directs étrangers, tout en favorisant le transfert de technologies vertes.

La comparaison des colonnes du tableau 5 apporte un élément supplémentaire. Les élasticités estimées de l'investissement direct étranger et des énergies renouvelables changent d'ampleur, mais non de signe, selon la structure d'effets retenue. Cette stabilité des signes constitue un indice de robustesse des résultats qualitatifs.

3.5. Test de Hausman et arbitrage entre effets fixes et effets aléatoires

Le test de Hausman compare les estimations issues des modèles à effets fixes et à effets aléatoires. Sous l'hypothèse nulle, les effets individuels ne sont pas corrélés aux variables explicatives : l'estimateur à effets aléatoires est alors convergent et efficace. Si cette hypothèse est rejetée, seul l'estimateur à effets fixes demeure convergent.

Tableau N°6 : Test de Hausman

Test	Modèle testé	Statistique	Degrés de liberté	p-value
Hausman	$\ln CO_2 = \ln IDE + \ln PIB + \ln CER + \ln POD$	$\chi^2 = 26,145$	4	2,959e-05

Source : élaboré par les auteurs à partir des sorties du logiciel R.

La probabilité associée au test est de $2,959e-05$, donc inférieure à 0,05. L'hypothèse nulle est rejetée : l'estimateur à effets aléatoires n'est pas convergent et le modèle à effets fixes est retenu. Ce résultat confirme le choix de spécification opéré à l'issue des tests précédents.

4. Conclusion

Cette étude a examiné la relation entre les investissements directs étrangers, les énergies renouvelables et les émissions de dioxyde de carbone en Afrique du Nord sur la période 2000-2022, à partir des Indicateurs du développement dans le monde de la Banque mondiale et d'une modélisation en données de panel à effets fixes.

Trois résultats se dégagent. Premièrement, les investissements directs étrangers sont associés à une hausse des émissions de dioxyde de carbone, ce qui est cohérent avec l'hypothèse du havre de pollution pour la région, sans toutefois en constituer une preuve directe compte tenu de la nature statique du modèle ; ce résultat pourrait notamment s'expliquer, entre autres facteurs, par une concentration des flux entrants dans des activités à forte intensité carbone, hypothèse qui ne peut être directement testée avec les données disponibles. Deuxièmement, la densité de population exerce l'effet aggravant le plus marqué, ce qui renvoie à la satisfaction, par des technologies peu économes, de besoins croissants en énergie, en transport et en logement. Troisièmement, la consommation d'énergies renouvelables réduit significativement les émissions, ce qui conforte les analyses de la transition énergétique. L'effet du produit intérieur brut par habitant, en revanche, n'apparaît pas significatif une fois l'hétérogénéité individuelle contrôlée : la trajectoire décrite par la courbe environnementale de Kuznets n'est donc pas identifiée sur ces données, et cette question mérite un traitement spécifique.

Ces résultats appellent une lecture nuancée en matière de politique économique. Puisque l'investissement direct étranger accroît les émissions dans la configuration observée, l'enjeu n'est pas d'en accroître le volume mais d'en réorienter la composition. Les dispositifs de conditionnalité environnementale, les incitations ciblées sur les projets solaires et éoliens et le renforcement des cadres réglementaires constituent à cet égard les leviers les plus directs. L'attraction de technologies vertes, permettant de produire de l'énergie à partir de sources solaires, éoliennes et de biomasse, joue un rôle clé dans la transition énergétique de la région. Par ailleurs, la croissance démographique et la densification urbaine soulignent la nécessité d'intégrer les technologies bas carbone dans les secteurs de l'énergie, du transport et de l'agriculture.

Cette étude comporte plusieurs limites qui ouvrent autant de pistes de recherche. Le modèle est estimé en panel statique : les travaux d'Omri et al. (2014) ayant mis en évidence une causalité

bidirectionnelle entre émissions et investissements directs étrangers, les coefficients rapportés ici doivent être lus comme des associations conditionnelles et non comme des effets causaux. Le rejet du test de poolabilité indique en outre que l'hypothèse d'homogénéité des pentes entre pays est contestable, ce qui plaide pour des estimateurs hétérogènes de panel. En outre, l'agrégat des investissements directs étrangers ne permet pas de distinguer les flux dirigés vers les activités polluantes de ceux dirigés vers les énergies propres ; une décomposition sectorielle des flux, dans la lignée de Doytch et Narayan (2016), constituerait un prolongement naturel de ce travail. Enfin, le recours aux émissions totales de CO₂ plutôt qu'à une mesure par habitant ou rapportée au PIB constitue une limite supplémentaire, les pays de l'échantillon présentant des tailles économiques et démographiques très hétérogènes, notamment l'Égypte et la Mauritanie ; les effets fixes pays introduits dans le modèle en atténuent en partie les conséquences, mais une réplification à partir d'une mesure normalisée des émissions constituerait un complément utile.

BIBLIOGRAPHIE

- Acharyya, J. (2009). FDI, growth and the environment: Evidence from India on CO₂ emission during the last two decades. *Journal of Economic Development*, 34(1), 43-58.
- Ahmadi, Z. (2024). Decomposing the magnitude and technical effects of financial growth and FDI on renewable energy use. *Journal of the Knowledge Economy*, 15(3), 14286-14306.
- Alam, M. M., Murad, M. W., Noman, A. H. M., & Ozturk, I. (2016). Relationships among carbon emissions, economic growth, energy consumption and population growth: Testing Environmental Kuznets Curve hypothesis for Brazil, China, India and Indonesia. *Ecological Indicators*, 70, 466-479.
- Amoah, J. O., Alagidede, I. A., & Sare, Y. A. (2023). Impact of Foreign Direct Investment on carbon emission in sub-Saharan Africa: The mediating and moderating roles of industrialization and trade openness. *Cogent Business & Management*, 10(3), 2266168.
- Appiah-Otoo, I., Chen, X., & Ampah, J. D. (2023). Exploring the moderating role of foreign direct investment in the renewable energy and economic growth nexus: Evidence from West Africa. *Energy*, 281, 128346.
- Caglar, A. E. (2020). The importance of renewable energy consumption and FDI inflows in reducing environmental degradation: Bootstrap ARDL bound test in selected 9 countries. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121663.

- Chowdhury, E. K., & Chowdhury, R. (2022). Empirical research on the relationship between renewable energy consumption, foreign direct investment and economic growth in South Asia. *Journal of Energy Markets*, 15(2).
- Copeland, B. R., & Taylor, M. S. (1994). North-South trade and the environment. *The Quarterly Journal of Economics*, 109(3), 755-787.
- Dormont, B. (1989). Introduction à l'économétrie des données de panel : théorie et applications à des échantillons d'entreprises. Paris : CNRS Éditions, Monographies d'économétrie.
- Doytch, N., & Narayan, S. (2016). Does FDI influence renewable energy consumption? An analysis of sectoral FDI impact on renewable and non-renewable industrial energy consumption. *Energy Economics*, 54, 291-301.
- El Amri, A., Oulfarsi, S., Eddine, A. S., El Khamlichi, A., Hilmi, Y., Ibenrissoul, A., ... & Boutti, R. (2022). Carbon Financial Market: The Case of the EU Trading Scheme. In *Handbook of Research on Energy and Environmental Finance 4.0* (pp. 424-445). IGI Global.
- Eskeland, G. S., & Harrison, A. E. (2003). Moving to greener pastures? Multinationals and the pollution haven hypothesis. *Journal of Development Economics*, 70(1), 1-23.
- Grabara, J., Tleppayev, A., Dabylova, M., Mihardjo, L. W. W., & Dacko-Pikiewicz, Z. (2021). Empirical research on the relationship amongst renewable energy consumption, economic growth and foreign direct investment in Kazakhstan and Uzbekistan. *Energies*, 14(2), 332.
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353-377.
- International Energy Agency (2019). *Morocco Renewable Energy Target 2030*. Paris : IEA.
- International Energy Agency (2024). *CO2 Emissions in 2023*. Paris : IEA.
- Kilicarslan, Z. (2019). The relationship between foreign direct investment and renewable energy production: Evidence from Brazil, Russia, India, China, South Africa and Turkey. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 9(4), 291-297.
- MacDermott, R. (2009). A panel study of the pollution-haven hypothesis. *Global Economy Journal*, 9(1), 1-14.
- Mert, M., & Bölük, G. (2016). Do foreign direct investment and renewable energy consumption affect the CO2 emissions? New evidence from a panel ARDL approach to Kyoto Annex countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(21), 21669-21681.
- Naz, S., Sultan, R., Zaman, K., Aldakhil, A. M., Nassani, A. A., & Abro, M. M. Q. (2019). Moderating and mediating role of renewable energy consumption, FDI inflows, and economic

growth on carbon dioxide emissions: Evidence from robust least square estimator. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(3), 2806-2819.

Omri, A., Nguyen, D. K., & Rault, C. (2014). Causal interactions between CO2 emissions, FDI, and economic growth: Evidence from dynamic simultaneous-equation models. *Economic Modelling*, 42, 382-389.

Onifade, S. T., Erdoğan, S., Alagöz, M., & Bekun, F. V. (2021). Renewables as a pathway to environmental sustainability targets in the era of trade liberalization: Empirical evidence from Turkey and the Caspian countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(31), 41663-41674.

Paramati, S. R., Mo, D., & Gupta, R. (2017). The effects of stock market growth and renewable energy use on CO2 emissions: Evidence from G20 countries. *Energy Economics*, 66, 360-371.

Shahbaz, M., Balsalobre-Lorente, D., & Sinha, A. (2019). Foreign direct Investment-CO2 emissions nexus in Middle East and North African countries: Importance of biomass energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 217, 603-614.

Talukdar, D., & Meisner, C. M. (2001). Does the private sector help or hurt the environment? Evidence from carbon dioxide pollution in developing countries. *World Development*, 29(5), 827-840.

To, A. H., Ha, D. T. T., Nguyen, H. M., & Vo, D. H. (2019). The impact of foreign direct investment on environment degradation: Evidence from emerging markets in Asia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(9), 1636.

Uzar, U., & Eyuboglu, K. (2019). Is foreign direct investment an engine for energy consumption? An empirical investigation for Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(27), 28092-28105.

Waldkirch, A., & Gopinath, M. (2008). Pollution control and foreign direct investment in Mexico: An industry-level analysis. *Environmental and Resource Economics*, 41(3), 289-313.

Walter, I., & Ugelow, J. L. (1979). Environmental policies in developing countries. *Ambio*, 8(2-3), 102-109.

Xie, Q., & Liu, J. (2019). Combined nonlinear effects of economic growth and urbanization on CO2 emissions in China: Evidence from a panel data partially linear additive model. *Energy*, 186, 115868.

Xu, C., Zhao, W., Zhang, M., & Cheng, B. (2021). Pollution haven or halo? The role of the energy transition in the impact of FDI on SO2 emissions. *Science of the Total Environment*, 763, 143002.