

Université de Strasbourg
Département d'Économie
Cours d'Économétrie des Données de Panel

Impact de la Transition Énergétique sur la Croissance Économique : Une Analyse en Données de Panel

Auteur : Théotime TUROLLA
Encadrant : El Ouardighi Jalal
Date : 7 Février 2025

logo_universite.png

Table des matières

1	Introduction	2
2	Revue de littérature	2
3	Présentation des données et statistiques descriptives	3
3.1	Traitement des valeurs manquantes et transformation des données	4
4	Analyse des coefficients estimés et comparaison des modèles	5
4.1	Comparaison des coefficients estimés	5
4.2	Choix du modèle optimal	5
4.3	Tests de validation des modèles	5
5	Validité statistique et économique du modèle	6
5.1	Analyse des coefficients et du R^2	6
5.2	Interprétation et implications économiques	6
5.3	Limites et pistes d'amélioration	6
5.4	Conclusion	7

1 Introduction

La question du coût économique de la transition énergétique est au cœur des débats contemporains. Plusieurs travaux, comme le *Stern Review on the Economics of Climate Change* (Stern, 2006), mettent en évidence que « le coût de l'inaction environnementale dépasserait largement celui de la transition énergétique ». Le changement climatique engendre des dommages irréversibles, et une transition forcée de l'économie deviendrait inévitable lorsque les ressources fossiles seront trop chères ou épuisées. Selon ce rapport, *l'inaction pourrait réduire le PIB mondial de 20 % à long terme*, tandis qu'une transition rapide coûterait environ 1 % du PIB mondial par an si elle était initiée immédiatement. Autrement dit, « les États doivent accélérer volontairement la transition énergétique, faute de quoi celle-ci s'imposera sous l'effet de la raréfaction des ressources fossiles et des contraintes climatiques » (Jean-Marc Jancovici, interview).

Bien que l'urgence climatique impose une action immédiate, la transition énergétique reste lente et inégale entre pays. Certains ont réduit l'intensité carbone de leur économie en développant les énergies renouvelables et en améliorant l'efficacité énergétique. D'autres restent fortement dépendants des combustibles fossiles, notamment les économies émergentes. Ce travail évalue l'impact de la transition énergétique sur la croissance économique, en utilisant une approche économétrique en données de panel. L'objectif est d'examiner dans quelle mesure les investissements dans l'énergie propre, la réduction de l'intensité énergétique et l'évolution de la consommation d'énergies fossiles influencent la dynamique du PIB.

L'étude mobilise plusieurs variables explicatives : l'intensité énergétique, qui mesure l'efficacité énergétique d'un pays ; la consommation d'énergies fossiles, indicateur clé de la dépendance aux hydrocarbures ; les dommages liés aux émissions de CO₂, qui capturent les coûts environnementaux de l'activité économique ; et la production d'électricité renouvelable, permettant d'évaluer la part d'énergie propre dans le mix énergétique.

L'analyse repose sur un modèle linéaire en panel, car il permet d'étudier les relations entre ces variables tout en restant interprétable. L'équation du modèle est la suivante :

$$GDPgrowth_{it} = \alpha + \beta_1 CarbonDamage_{it} + \beta_2 EnergyIntensity_{it} + \beta_3 FossilConsumption_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

où $GDPgrowth_{it}$ représente la croissance économique annuelle du pays i à la période t . $CarbonDamage_{it}$ désigne les dommages liés aux émissions de CO₂, ajustés en fonction de l'épargne nationale. $EnergyIntensity_{it}$ mesure l'intensité énergétique, soit la quantité d'énergie utilisée par unité de PIB. $FossilConsumption_{it}$ indique la part des énergies fossiles dans la consommation totale d'énergie. μ_i capte les effets fixes individuels, tenant compte des différences structurelles entre les pays, tandis que λ_t contrôle les effets fixes temporels, intégrant les chocs globaux (crises économiques, politiques énergétiques mondiales...). Enfin, ε_{it} est l'erreur aléatoire, regroupant les facteurs non observés influençant la croissance.

Ce modèle à effets fixes permet de neutraliser la variabilité non observée entre les pays et au fil du temps, garantissant ainsi des résultats robustes. Des corrections pour l'hétéroscédasticité et l'autocorrélation des erreurs sont intégrées afin d'affiner l'estimation de l'impact des variables énergétiques sur la croissance du PIB.

2 Revue de littérature

La relation entre transition énergétique et croissance économique a été largement étudiée dans la littérature. Giraud et Kahraman (2014) analysent le lien entre consommation d'énergie primaire et PIB à travers un modèle d'erreur de correction appliqué à 33 pays entre 1970 et 2011. Ils concluent que « une augmentation (ou diminution) de 10% de la consommation d'énergie par habitant induit, en moyenne, une variation de 6 à 7% du PIB par habitant » Giraud and Kahraman (2014).

D'autres études examinent les impacts macroéconomiques d'une transition énergétique complète. Dupont, Germain et Jeanmart (2021) montrent qu'une transition rapide est difficilement réalisable sans politiques économiques adaptées, expliquant que « dans un contexte business-as-usual, une transition énergétique complète à l'échelle mondiale paraît irréalisable avant la fin du siècle » Dupont and Germain (2021).

Enfin, une analyse sur les économies européennes met en évidence une relation négative entre l'intensité énergétique et la croissance du PIB, suggérant que « la baisse de l'intensité énergétique est souvent corrélée à une réduction de l'activité industrielle, particulièrement dans les économies en transition ». Ces résultats

s'alignent avec notre étude, où l'intensité énergétique et la consommation fossile apparaissent comme des facteurs clés de la dynamique économique.

3 Présentation des données et statistiques descriptives

Les données utilisées pour cette analyse proviennent de la Banque mondiale et couvre la période de 1990 à 2023. Les données sont structurées sous forme de panel, où chaque observation représente un pays pour une année donnée, formant une unité d'observation sous la forme d'un couple pays, année. Il y a 269 pays dans l'échantillon répartis sur 34 années, soit un total de 9146 observations. Les variables analysées incluent des indicateurs économiques et environnementaux, tels que la croissance du PIB, l'intensité énergétique, la consommation d'énergie fossile, la production d'électricité renouvelable, et les émissions de dioxyde de carbone liées à l'économie (en pourcentage du revenu national brut). Ces variables peuvent être classées en deux catégories : la variable dépendante (croissance du PIB), et les variables explicatives (la consommation d'énergie fossile et la production d'électricité renouvelable).

Il y avait des valeurs manquantes pour certaines années et certains pays, donc nous avons fait une interpolation pour compléter les données. Ensuite, nous avons calculé des statistiques descriptives comme la moyenne, la médiane, les valeurs minimales et maximales, ainsi que l'écart-type pour mieux comprendre la distribution des variables. Nous avons aussi utilisé une matrice de corrélation pour voir comment les variables sont liées entre elles.

Le jeu de données est presque équilibré, car chaque pays est présent sur toutes les années, sauf quelques exceptions où il manque des données pour certaines périodes. Même si le panel est légèrement déséquilibré, il reste assez complet pour faire une analyse fiable.

Statistiques descriptives

Variable	<i>n</i>	Moyenne	Écart-type	Médiane	Trimmed	MAD	Min	Max	Skewness	Kurtosis
Année	9146	2006.5	9.81	2006.5	2006.5	12.60	1990	2023	0	1.80
Adjusted savings : carbon dioxide damage (% of GNI)	8534	1.89	3.52	1.17	1.45	0.85	0.0039	164.76	26.08	1037.94
Electricity production from renewable sources, excluding hydroelectric (kWh)	6392	32546170056.32	130555973412.35	286500000	3891555924.91	424764900	0	1.64×10^{12}	6.88	61.99
Energy intensity level of primary energy (MJ/\$2017 PPP GDP)	8466	5.68	3.62	4.87	5.10	2.37	0.11	30.44	2.45	12.05
Fossil fuel energy consumption (% of total)	7446	58.31	34.57	71.13	60.50	33.90	0	100	-0.54	1.84
GDP growth (annual %)	8908	3.20	6.25	3.50	3.41	3.39	-64.05	149.97	2.15	68.46

TABLE 1 – Statistiques descriptives des variables étudiées.

Les statistiques descriptives mettent en évidence des distributions asymétriques pour les variables étudiées :

- **Dommages liés au CO (% du RNB)** : La moyenne est de 1.89 avec un écart-type de 3.52. La médiane est plus basse (1.17), ce qui indique une forte asymétrie à droite (*skewness* = 26.08). Cela signifie que certains pays subissent des dommages très élevés, alors que la plupart ont des niveaux plus faibles.
- **Production d'électricité renouvelable (hors hydroélectricité) (kWh)** : La moyenne est de 32.5 milliards de kWh avec un écart-type élevé (130.56 milliards de kWh). La médiane, beaucoup plus basse (286.5 millions de kWh), montre une distribution très asymétrique (*skewness* = 6.88). Cela signifie que quelques pays produisent énormément d'électricité renouvelable, tandis que la majorité en produit peu.
- **Intensité énergétique (MJ/\$ PIB en PPA 2017)** : La moyenne est de 5.68 MJ/\$ avec un écart-type de 3.62. La médiane est légèrement inférieure (4.87), indiquant une distribution modérément asymétrique à droite (*skewness* = 2.45). Cette variation reflète des différences entre les économies des pays.
- **Consommation d'énergies fossiles (% du total)** : La moyenne est de 58.31 % avec un écart-type de 34.57 %. La distribution est presque symétrique (*skewness* = -0.54). La médiane est plus élevée (71.13 %), ce qui montre que la plupart des pays dépendent encore fortement des combustibles fossiles, même si certains ont réduit leur consommation.
- **Croissance du PIB (en % par an)** : Cette variable est très dispersée avec une moyenne de 3.20 % et un écart-type de 6.25 %. La médiane (3.50 %) est proche de la moyenne, mais la distribution est légèrement asymétrique (*skewness* = 2.15). Il y a des valeurs extrêmes, avec un minimum de -64.05 % et un maximum de 149.97 %.

Ces résultats montrent une hétérogénéité importante entre les pays, et aussi entre les périodes, comme l'indiquent les écarts importants entre les minimums et les maximums des variables. Par exemple, la

production d'énergie renouvelable varie de 0 à 1.64 trillion de kWh, et la consommation de combustibles fossiles oscille entre 0% et 100%. Ces disparités reflètent des contextes économiques, géographiques et politiques variés.

Enfin, des variations interannuelles importantes, observées pour certains pays (par exemple, les variations drastiques de consommation énergétique ou de croissance économique d'une année à l'autre), pourraient introduire des biais dans les interprétations des statistiques. Ces effets seront pris en compte dans les analyses ultérieures, notamment à travers l'examen des effets fixes individuels et temporels.

Il n'y a pas de colonnes contenant plus de 5. Puisqu'il y a très peu de NA, on peut : Supprimer les observations concernées (car elles sont peu nombreuses). Remplacer par la moyenne ou médiane de la variable si cela fait sens économiquement.

3.1 Traitement des valeurs manquantes et transformation des données

Avant d'estimer les modèles économétriques, il était nécessaire de traiter les valeurs manquantes dans la base de données afin d'éviter la suppression excessive d'observations et de garantir la robustesse des résultats. Différentes stratégies ont été mises en place en fonction de la nature de chaque variable, en respectant les principes économiques sous-jacents.

Tout d'abord, les observations pour lesquelles la variable dépendante, la *croissance du PIB (GDP growth, annual %)*, était manquante ont été supprimées, car aucune imputation n'était possible pour la variable expliquée. Ensuite, les variables explicatives ont été traitées selon différentes méthodes :

- **Dommages liés aux émissions de CO₂ (% du RNB)** : Cette variable présente une tendance relativement stable dans le temps. Les valeurs manquantes ont été imputées par **interpolation linéaire** (*na.approx()*), permettant ainsi de préserver la dynamique de la série tout en évitant l'introduction d'un biais arbitraire.
- **Production d'électricité renouvelable (hors hydroélectricité, en kWh)** : Dans certains pays, cette variable est égale à zéro sur certaines périodes. Une interpolation simple aurait introduit une dynamique artificielle dans des cas où l'absence de production est structurelle. Ainsi, nous avons complété les valeurs manquantes en utilisant **la médiane par pays** lorsque des données étaient disponibles, tout en conservant les valeurs nulles lorsque la production était historiquement absente.
- **Intensité énergétique (MJ par PIB à parité de pouvoir d'achat de 2017)** : Cette variable est censée évoluer de manière progressive. Par conséquent, une **interpolation linéaire** a été appliquée pour compléter les valeurs manquantes tout en respectant la tendance économique sous-jacente.
- **Consommation d'énergie fossile (% du total)** : Cette variable présente également une évolution graduelle, car les transitions énergétiques ne sont pas instantanées. Pour éviter la suppression d'observations, une interpolation linéaire a été appliquée, suivie d'une imputation par **la médiane par pays** lorsque des données restaient manquantes.

Enfin, une vérification finale a été effectuée pour s'assurer que toutes les valeurs manquantes avaient bien été traitées. Une fois ce prétraitement terminé, la base de données a été convertie en format *panel* (`pdata.frame`) afin d'être exploitée pour l'estimation des modèles économétriques.

TABLE 2 – Résultats des estimations économétriques

Variables	Modèles					
	MCO	Effets Fixes	Effets Aléatoires	Between	GLS	GMM
Dommages CO₂	-0.0287 (0.020)	-0.119*** (0.023)	-0.091*** (0.022)	0.250*** (0.067)	-0.116*** (0.025)	0.240 (0.141)
Électricité renouvelable	-1.037e-12 (5.87e-13)	—	—	—	—	—
Intensité énergétique	-0.0512** (0.020)	-0.346*** (0.043)	-0.129*** (0.028)	-0.038 (0.039)	-0.039 (0.026)	-1.072* (0.475)
Consommation fossile	-0.0046* (0.002)	-0.035*** (0.009)	-0.007* (0.003)	-0.009* (0.004)	-0.003 (0.003)	-0.023 (0.056)
Intercept	3.916*** (0.176)	—	4.586*** (0.281)	3.530*** (0.323)	3.881*** (0.240)	—
Effets temporels	Non	Non	Non	Non	Non	Oui
R² ajusté	0.002	-0.014	0.006	0.048	—	—
F-statistique / Chi2	5.35	44.07	56.24	5.22	—	21.20
p-value	0.00027	<2.2e-16	3.7e-12	0.0016	—	0.00029
Test d'Hausman	—	Préféré	Rejeté	—	—	—
Sargan Test (GMM)	—	—	—	—	—	p < 0.001

Significativité : *** p<0.001, ** p<0.01, * p<0.05

4 Analyse des coefficients estimés et comparaison des modèles

4.1 Comparaison des coefficients estimés

L'analyse des coefficients estimés met en évidence des différences notables selon les modèles adoptés.

Dans la régression MCO (*Moindres Carrés Ordinaires*), le coefficient des dommages CO₂ est négatif (-0.0287), mais il n'est pas statistiquement significatif ($p = 0.160$). Cela indique que lorsque l'on ne contrôle pas les spécificités propres aux pays et aux périodes, la relation entre les dommages CO₂ et la croissance économique demeure incertaine.

Le modèle **à effets fixes individuels** révèle un coefficient négatif plus marqué (-0.119***) et significatif au seuil de 1%, suggérant que les dommages environnementaux affectent significativement la croissance une fois les caractéristiques propres à chaque pays contrôlées.

Le modèle **Between** (comparaison inter-pays) affiche un coefficient opposé (0.250***), ce qui suggère que les pays historiquement plus pollués ont également connu des croissances économiques plus élevées. En revanche, le modèle **à effets aléatoires** fournit un coefficient intermédiaire (-0.091***), confirmant une relation globalement négative.

Enfin, l'estimation par **moindres carrés généralisés (GLS)**, qui corrige l'autocorrélation des erreurs, affiche un coefficient de -0.116***, montrant que l'effet négatif des dommages CO₂ persiste même en tenant compte des structures temporelles.

4.2 Choix du modèle optimal

Le **modèle à effets fixes** est retenu comme le plus approprié. Plusieurs éléments motivent ce choix :

- **La significativité des coefficients** : Contrairement au MCO, le modèle à effets fixes révèle une relation significative entre les dommages CO₂ et la croissance, ce qui souligne l'importance de prendre en compte les spécificités propres aux pays.
- **L'élimination du biais d'hétérogénéité** : Les effets fixes permettent de neutraliser les différences structurelles entre les pays, ce qui est crucial dans une analyse de panel.
- **Le test de Hausman** (voir ci-après) confirme que les effets fixes sont préférables aux effets aléatoires.

Toutefois, la présence d'hétéroscédasticité et d'autocorrélation des erreurs nécessite une correction des erreurs standard, ce qui motive l'utilisation d'un modèle à effets fixes avec erreurs robustes.

4.3 Tests de validation des modèles

Afin de vérifier la pertinence du modèle retenu, plusieurs tests économétriques ont été réalisés :

- **Test de Hausman** : Ce test permet de choisir entre effets fixes et effets aléatoires. La p-value très faible ($p < 2.2 \times 10^{-16}$) conduit au rejet des effets aléatoires au profit des effets fixes.
- **Test de Breusch-Pagan** : Ce test détecte une hétéroscédasticité significative ($p < 2.2 \times 10^{-16}$), justifiant l'utilisation d'erreurs robustes.
- **Test de Wooldridge** : La présence d'autocorrélation des erreurs est confirmée ($p = 3.357 \times 10^{-6}$), ce qui implique que les erreurs robustes sont également nécessaires.
- **Test F** : Le test F global montre que les variables explicatives contribuent significativement au modèle ($p < 2.2 \times 10^{-16}$).

TABLE 3 – Résultats des tests statistiques

Test	Statistique	Degrés de liberté	p-value
Test de Hausman	94.35	3	< 2.2e-16
Test de Breusch-Pagan	5986.3	3	< 2.2e-16
Test de Wooldridge	21.63	1, 8347	3.357e-06
Test de Dickey-Fuller	-40.031	2	0.01
Test de Multicolinéarité (VIF)	Max VIF = 1.12	-	Pas de problème
Test F (pFtest)	3.8917	252, 8346	< 2.2e-16

5 Validité statistique et économique du modèle

5.1 Analyse des coefficients et du R^2

Le modèle final retenu est le modèle à effets fixes avec erreurs robustes. L'équation estimée est la suivante :

$$\text{GDPgrowth}_{it} = \alpha + \beta_1 \text{CarbonDamage}_{it} + \beta_2 \text{EnergyIntensity}_{it} + \beta_3 \text{FossilConsumption}_{it} + \mu_i + \lambda_t + \epsilon_{it} \quad (2)$$

Les résultats du modèle sont présentés dans le tableau suivant :

TABLE 4 – Modèle à effets fixes avec erreurs robustes (HC0)

Variable	Coefficient	p-value
Dommages CO ₂	-0.119	0.100
Intensité énergétique	-0.346***	0.0002
Consommation fossile	-0.035*	0.041

Le R^2 ajusté varie selon les spécifications :

- Modèle Between (0.048) : Faible capacité explicative des différences inter-pays.
- Modèle Within (effets fixes) (-0.014) : Moins optimisé en termes d'ajustement, mais économiquement pertinent.
- Modèle à effets aléatoires (0.006) : Faible pertinence, confirmant l'intérêt des effets fixes.

5.2 Interprétation et implications économiques

Les résultats montrent plusieurs tendances :

- Une taxation plus élevée du carbone semble liée à une croissance plus faible, mais cet effet devient statistiquement incertain après correction des erreurs robustes.
- L'intensité énergétique a un impact négatif fort et significatif, soulignant la nécessité d'une transition vers des technologies plus efficaces.
- La consommation d'énergies fossiles réduit légèrement la croissance, ce qui peut s'expliquer par des coûts de transition élevés.

5.3 Limites et pistes d'amélioration

Bien que le modèle à effets fixes avec erreurs robustes ait été retenu comme le plus pertinent, certaines améliorations peuvent être envisagées pour affiner l'analyse et renforcer la robustesse des résultats.

- **Ajout de variables explicatives supplémentaires** : Actuellement, le modèle prend en compte les dommages liés au CO₂, l'intensité énergétique et la consommation d'énergies fossiles. Mais d'autres facteurs pourraient influencer la relation entre transition énergétique et croissance économique comme les subventions aux énergies renouvelables, les politiques environnementales (l'introduction de réglementations plus strictes comme les quotas d'émissions de CO₂, les taxes environnementales, ou les normes énergétiques peuvent impacter à la fois la croissance et la transition énergétique...
- **Prise en compte de l'endogénéité par un modèle dynamique (GMM)** : L'une des principales limites du modèle à effets fixes est qu'il suppose que toutes les variables explicatives sont exogènes, (qu'elles ne sont pas influencées par la variable dépendante (la croissance du PIB)). Or, dans le cas de la transition énergétique, il est probable qu'une relation de causalité inverse existe :
 - Un pays avec une forte croissance pourrait investir davantage dans la transition énergétique.
 - Une économie en ralentissement pourrait privilégier des sources d'énergie fossiles moins coûteuses.

Pour traiter cette potentielle endogénéité, une approche par GMM (Generalized Method of Moments) serait plus appropriée. Le modèle GMM permet d'utiliser les retards des variables comme instruments, réduisant ainsi le biais de simultanéité et offrant une meilleure identification des effets causaux. Cela serait particulièrement utile pour vérifier si les politiques énergétiques ont un impact à long terme sur la croissance.

- **Analyse par sous-groupes : pays développés vs pays émergents** : L’impact de la transition énergétique n’est probablement pas homogène entre les pays. Certains États, plus industrialisés et avancés technologiquement, pourraient mieux absorber le coût de la transition grâce à des infrastructures modernes et des politiques d’innovation. En revanche, les pays émergents pourraient être plus vulnérables aux coûts économiques d’une transition rapide. Une analyse en sous-groupes permettrait de mieux comprendre ces dynamiques et d’évaluer si des stratégies différenciées sont nécessaires pour accompagner la transition énergétique selon le niveau de développement des pays.

5.4 Conclusion

L’analyse économétrique réalisée met en évidence un impact négatif des dommages liés au CO_2 et de l’intensité énergétique sur la croissance du PIB, tandis que la consommation d’énergies fossiles présente un effet légèrement négatif mais significatif. Après comparaison des différents modèles, le **modèle à effets fixes avec erreurs robustes** a été retenu comme le plus approprié, car il permet de :

- Contrôler les spécificités propres à chaque pays.
- Corriger l’hétéroscédasticité et l’autocorrélation des erreurs.
- Fournir des coefficients économiquement interprétables et significatifs.

Toutefois, plusieurs pistes d’amélioration pourraient être explorées. L’inclusion de variables additionnelles, telles que les subventions aux énergies renouvelables ou les politiques environnementales, permettrait d’affiner la compréhension des mécanismes en jeu. De plus, la prise en compte d’une potentielle endogénéité à travers un modèle GMM aiderait à mieux identifier les relations causales. Enfin, une analyse par sous-groupes (pays développés vs émergents) mettrait en lumière d’éventuelles différences structurelles et aiderait à formuler des recommandations adaptées aux spécificités de chaque pays.

En conclusion, bien que notre modèle fournisse des résultats statistiquement valides et économiquement pertinents, une approche plus dynamique et segmentée permettrait de mieux comprendre les enjeux économiques de la transition énergétique et d’orienter les décisions politiques en conséquence.

Références

- Dupont, B. and Germain, Maxime et Jeanmart, H. (2021). Impacts de la transition énergétique sur la croissance. *Discussion Paper DT2021-01, Université Catholique de Louvain*.
- Giraud, G. and Kahraman, Z. (2014). How dependent is growth from primary energy? the dependency ratio of energy in 33 countries (1970-2011). *HAL Working Papers*.