

U.E : ÉCONOMÉTRIE APPLIQUÉE II :

La Courbe Environnementale de Kuznets, le cas des BRICS pour la période 1988-2022.

ÉCONOMÉTRIE DES DONNÉES DE PANEL

CORBARI Ugo

Introduction :

Les pays émergents, en particulier ceux du groupe des BRICS (Brésil, Russie, Inde, Chine et Afrique du Sud), jouent un rôle de plus en plus déterminant dans l'économie mondiale. Ces nations, qui connaissent des taux de croissance rapide et un développement industriel marqué, sont cependant confrontées à des défis considérables en matière de durabilité écologique. Leur trajectoire de croissance se caractérise par une forte dépendance aux ressources naturelles et une accélération de la consommation énergétique, entraînant ainsi une pression croissante sur les écosystèmes. Ce constat est encore plus véridique depuis l'élargissement de ce groupe en 2023 à 6 nouveaux pays à savoir l'Arabie saoudite, l'Égypte, les Émirats arabes unis, l'Éthiopie, l'Iran et l'Argentine. La croissance économique de ces pays s'est-elle faite en dépit des questions liées à l'écologie ? Les BRICS ont-ils les moyens, la richesse et la volonté de diminuer leurs empreintes écologiques ?

En 1955 S. Kuznets met en place un corollaire visant à démontrer que les nations les moins développées cherchent en priorité à lutter contre la pauvreté en dépit des questions écologiques tandis que les nations riches ont les moyens de continuer de développer leurs économies tout en minimisant leurs empreintes écologiques. En d'autres termes dans les premières étapes du développement économique d'un pays la dégradation environnementale augmente jusqu'à un certain point où elle atteint un pic avant de diminuer à mesure que le niveau de richesse augmente, graphiquement la relation de Kuznets apparaît sous la forme d'un U-inversé.

Cette relation appelée courbe environnementale de Kuznets (ECK) nous amène à nous poser la question suivante : La Courbe environnementale de Kuznets est-elle valide pour le cas des BRICS entre 1988 et 2022 ? Pour répondre à cette question nous étudierons la dégradation environnementale sous l'aspect de l'émission de gaz à effets de serre (GES) par habitants qui sont composés de dioxyde de carbone, de méthane et d'oxyde nitreux provenant de toutes les sources et mesurés en tonnes d'équivalent dioxyde de carbone. Concernant la période et les pays étudiée, notre étude se concentrera uniquement sur les pays appartenant aux BRICS avant leurs élargissements de 2023, à savoir le Brésil, l'Inde, la Russie, la Chine et l'Afrique du Sud.

Ce travail est essentiellement fondé sur les travaux de Kuznets, ainsi que sur ceux de Qiang Wang, Ting Yang et Rongron Li. Ces derniers se sont chargés, en 2023, de tester la courbe ECK pour les émissions de CO₂ sur les données de panel de 56 pays classifiés en fonction de leurs revenus en trois catégories (élevé, intermédiaire supérieur et intermédiaire inférieur). Cette analyse a permis de révéler que la relation n'était pas sous forme de U inversé, comme le suggère l'hypothèse traditionnelle de la courbe de Kuznets environnementale, mais que la courbe prenait une forme en N, indiquant que les émissions de CO₂ augmentent à un certain stade du développement économique, diminuent après un seuil critique, puis repartent à la hausse à un niveau de revenu encore plus élevé.

Notre analyse, outre le fait de ne pas utiliser les mêmes données ni la même classification des pays, permet de contrôler plus précisément l'effet du PIB par habitant sur les émissions de GES par habitant en tenant compte du rôle de la population.

Cadre Statistique :

Les données utilisées pour cette étude proviennent toutes du site [Our World In Data](#) et celui de [La Banque Mondiale](#) elles s'organisent ainsi :

Pays <chr>	Variable <chr>	GDP <dbl>	GES <dbl>	Pop <dbl>
Afrique du Sud	Ecart_Type	1826.8925	0.8932197	6351837
Afrique du Sud	Maximum	8646.0557	12.0965840	60604992
Afrique du Sud	Minimum	2688.2368	8.2957420	37393854
Afrique du Sud	Moyenne	5103.0292	10.6420375	49081953
Brésil	Ecart_Type	3502.7679	1.8733357	21573412
Brésil	Maximum	13396.6244	18.9695850	214828540
Brésil	Minimum	2127.3164	10.9066010	143851505
Brésil	Moyenne	6480.6719	13.4352393	182673262
Chine	Ecart_Type	4005.5329	2.1680606	92161534
Chine	Maximum	12662.5827	9.4133960	1425893465
Chine	Minimum	283.5377	3.6385255	1115889802
Chine	Moyenne	3938.8210	6.1928900	1300428639
Inde	Ecart_Type	667.5358	0.3413523	180913217
Inde	Maximum	2352.6139	2.7733717	1417173174
Inde	Minimum	302.8848	1.7666316	833729679
Inde	Moyenne	986.0754	2.1306705	1143824829
Russie	Ecart_Type	4785.6692	2.7971461	2198025
Russie	Maximum	15941.4482	22.8644000	148538190
Russie	Minimum	1330.7572	12.6099010	141909248
Russie	Moyenne	7105.1483	16.1811781	145679965

Tableau 1: Statistiques Descriptives

Ces statistiques fournissent une vue d'ensemble des tendances centrales et de la dispersion des données pour les 175 observations de notre échantillon, pour chaque variable et pour chaque pays de notre analyse. La variable GES représente les gaz à effets de serre exprimés en tonnes par habitants quant à la variable GDP elle traduit le PIB par habitants exprimé en dollars constants de 2015, enfin la variable POP exprime la population pour chaque pays, pour chaque année en millions d'habitants. On observe des disparités importantes entre les pays. La Chine et l'Inde présentent des populations massives, tandis que l'Afrique du Sud et la Russie ont des niveaux de PIB/habitant plus élevés que l'Inde. Les émissions de GES varient également selon les structures économiques et énergétiques propres à chaque pays.

Pour que notre étude puisse aboutir à un résultat pertinent, il est essentiel de vérifier que les variables sont corrélées entre elles. Le calcul de la covariance entre les émissions de GES et le PIB donne un résultat positif, indiquant une relation ascendante entre les deux. Toutefois, le calcul du coefficient de corrélation entre ces variables donne une valeur de 0.5656, ce qui suggère une corrélation modérée à forte, mais loin d'être parfaite. Cela implique que, bien que le PIB joue un rôle dans l'évolution des émissions de GES, d'autres facteurs peuvent également influencer cette relation, rendant nécessaire une analyse plus approfondie à l'aide d'un modèle économétrique adapté.

Modèle et Résultats d'estimation :

Le modèle de Kuznets postule que la relation entre le PIB et les émissions de GES suit une courbe en U inversé, suggérant que la croissance économique initiale entraîne une augmentation

des émissions, mais qu'au-delà d'un certain seuil, la croissance favorise leur réduction grâce à des politiques environnementales plus strictes et des technologies plus propres. Le modèle estimé est le suivant :

$$\log(\text{GESit}) = \beta_0 + \beta_1 \log(\text{PIBit}) + \beta_2 \log(\text{PIBit})^2 + \beta_3 \log(\text{POPit}) + \text{eit}$$

Avec les variables GES, PIB et POP comme définit précédemment. Toutes les variables sont exprimées en log afin de pouvoir interpréter les résultats comme une élasticité, de plus la présence de $\log(\text{PIBit})^2$ est justifiable par la volonté de capturer les effets non linéaires du PIB sur les émissions de GES du fait de la forme en U-inversée de la courbe. Nous estimons notre modèle en utilisant différentes méthodes : le MCO, qui fournit une estimation classique sans prendre en compte les spécificités des pays ; le modèle à effets fixes, qui contrôle les effets inobservables propres à chaque pays ; le modèle à effets aléatoires, qui suppose que les différences entre pays sont aléatoires et non corrélées avec les variables explicatives ; et enfin, le modèle Moindres carrés Généralisés (GLS), qui corrige les problèmes d'hétéroscédasticité et d'autocorrélation en ajustant la structure de variance. Les résultats de ces différents modèles sont représentés dans ce tableau :

	MCO	Effets Fixes	Effets Aléatoires	GLS
(Intercept)	0.09 (1.67)		2.90 ** (0.91)	0.09 (1.67)
log_PIB	1.29 *** (0.37)	1.47 *** (0.13)	1.29 *** (0.16)	1.29 *** (0.37)
log_PIB^2	-0.06 * (0.02)	-0.08 *** (0.01)	-0.07 *** (0.01)	-0.06 * (0.02)
log_Pop	-0.24 *** (0.03)	-0.76 *** (0.11)	-0.34 *** (0.03)	-0.24 *** (0.03)
R^2	0.76	0.68	0.68	
Adj. R^2	0.76	0.66	0.68	
Num. obs.	175	175	175	175
s_idios			0.12	
s_id			0.07	
AIC				180.62
BIC				196.33
Log Likelihood				-85.31

*** p < 0.001; ** p < 0.01; * p < 0.05

Hausman Test

data: log_GES ~ log_PIB + I(log_PIB^2) + log_Pop
 chisq = 11.986, df = 3, p-value = 0.007431
 alternative hypothesis: one model is inconsistent

Tableau 2: Résultats d'estimation

Les résultats obtenus à partir des différentes méthodes d'estimation – Moindres Carrés Ordinaires (MCO), Effets Fixes, Effets Aléatoires et Moindres Carrés Généralisés (GLS)– permettent d'analyser la relation entre le PIB par habitant et les émissions de gaz à effet de serre par habitants pour les BRICS sur la période 1988-2022.

Tout d'abord, les coefficients estimés pour le PIB et le PIB² sont tous deux statistiquement significatifs au seuil de 5 %, ce qui confirme l'existence d'une relation non linéaire entre ces variables. Le coefficient du PIB est positif, ce qui implique qu'une augmentation du revenu par habitant entraîne initialement une hausse des émissions de GES. Cette relation est cohérente avec le développement économique des pays émergents, où la croissance s'accompagne souvent d'une industrialisation accrue et d'une dépendance aux énergies fossiles. En revanche, le coefficient du PIB² est négatif et significatif, indiquant qu'au-delà d'un certain seuil de revenu, les émissions de GES commencent à diminuer. Ce résultat valide l'hypothèse de la courbe environnementale de Kuznets (EKC) et suggère que les pays les plus avancés parmi les BRICS peuvent progressivement adopter des politiques de réduction des émissions grâce aux avancées technologiques et aux réglementations environnementales.

Les valeurs de *t de Student* associées à ces coefficients dépassent la valeur critique de 1,96 pour un seuil de 5 %, ce qui nous permet de rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle ces coefficients seraient nuls. De plus, les *p-values* sont inférieures à 0,05, renforçant la significativité statistique des résultats.

Concernant les autres variables, le coefficient associé à la population est négatif et significatif, bien que proche du seuil de 5 %. Cela pourrait indiquer que l'augmentation de la population ne se traduit pas nécessairement par une hausse proportionnelle des émissions, possiblement en raison d'une urbanisation plus efficace ou d'une transition vers des économies de services.

Enfin, les coefficients des modèles montrent des différences notables selon les méthodes d'estimation. Le modèle à Effets Fixes semble être le plus pertinent, car il contrôle les caractéristiques inobservables propres à chaque pays, évitant ainsi les biais d'endogénéité liés à l'hétérogénéité des BRICS. En revanche, le modèle à Effets Aléatoires repose sur l'hypothèse d'une absence de corrélation entre les effets spécifiques aux pays et les variables explicatives, ce qui peut être discutable dans ce cas. L'estimation par GLS ajuste la variance des erreurs et corrige d'éventuels problèmes d'hétéroscédasticité, améliorant ainsi la robustesse des résultats.

En termes de performance globale du modèle, le R^2 est relativement élevé dans les modèles FE et GLS, ce qui suggère que les variables explicatives retenues expliquent une grande part de la variance des émissions de GES. Toutefois, une part résiduelle d'incertitude demeure, ce qui pourrait être réduit par l'introduction d'autres variables explicatives, comme l'intensité énergétique ou le mix énergétique des pays étudiés.

Sur le plan statistique, les résultats obtenus sont cohérents avec les attentes théoriques. Les tests de significativité montrent que les coefficients clés (PIB, PIB²) sont robustes et significatifs. Le choix du modèle à Effets Fixes semble justifié par sa meilleure capacité à capter les spécificités de chaque pays, réduisant ainsi les biais d'omission.

D'un point de vue économique, l'existence d'une relation en U inversé entre le PIB et les émissions de GES suggère que les politiques environnementales deviennent plus efficaces à mesure que le revenu par habitant augmente. Ce résultat a des implications importantes pour les pays en développement : il met en évidence la nécessité d'investir tôt dans des technologies propres afin d'atteindre le point de retournement plus rapidement.

Cependant, ces résultats doivent être interprétés avec prudence. La relation observée peut être influencée par d'autres facteurs non inclus dans le modèle, tels que l'efficacité énergétique, la part des énergies renouvelables ou encore les réglementations environnementales propres à chaque pays. Une analyse complémentaire intégrant ces dimensions pourrait renforcer la robustesse des conclusions et affiner les recommandations en matière de politiques publiques.

Conclusion:

L'hypothèse de la courbe environnementale de Kuznets est essentielle pour comprendre la relation entre développement économique et émissions de gaz à effet de serre. Nos résultats, obtenus à partir des différentes méthodes d'estimation appliquées aux pays des BRICS pour la période 1988-2022, confirment une relation non linéaire entre le PIB par habitant et les émissions de GES. Dans un premier temps, la croissance économique entraîne une augmentation des émissions, mais au-delà d'un certain seuil de développement, celles-ci tendent à diminuer, suggérant une transition vers des modes de production plus durables et une meilleure efficacité énergétique.

Toutefois, nos résultats montrent également que cette relation est sensible aux spécifications du modèle et à la transformation des variables. L'introduction du PIB² permet de mieux capturer cette dynamique non linéaire, mais des différences subsistent entre les pays en fonction de leur niveau de développement et de leurs politiques environnementales. L'impact de la population sur les émissions de GES est également significatif, bien que négatif, ce qui met en évidence le rôle des structures démographiques et des économies d'échelle dans la gestion des émissions. L'évolution récente des BRICS soulève des questions importantes quant à la validité de la courbe environnementale de Kuznets dans un contexte géopolitique et économique en mutation.

Depuis 2023, l'élargissement du groupe avec l'intégration de nouveaux pays comme l'Arabie Saoudite, l'Égypte, l'Iran, les Émirats arabes unis, et l'Argentine modifie les dynamiques économiques et environnementales du bloc. Ces nouveaux entrants possèdent des structures économiques très différentes des membres fondateurs, en particulier avec une forte dépendance aux énergies fossiles (pétrole et gaz). Cela soulève des incertitudes sur la capacité du groupe à converger vers une transition énergétique cohérente et à limiter ses émissions de gaz à effets de serre.

Nos résultats doivent être interprétés en gardant à l'esprit que la relation que nous avons spécifiée ne prend pas en compte la délocalisation de la pollution vers d'autres pays, un phénomène particulièrement visible dans les BRICS où certaines industries polluantes migrent vers des régions aux réglementations environnementales plus souples. De plus, la transition écologique n'est pas uniquement liée au revenu, mais également aux choix politiques et stratégiques de chaque pays.

Enfin, il serait intéressant d'ouvrir cette analyse à de nouvelles variables tels que la part de chaque industrie dans l'émissions de GES. Un autre axe de développement de cette étude serait de

l'élargir aux nouveaux pays ayant rejoint les BRICS depuis 2023 afin de capter l'impact de cette intégration sur les nouvelles velléités économiques et environnementales du groupe BRICS élargis

Bibliographies:

KUZNETS S. (1955) "Economic growth and income inequality", *Am. Econ. Rev.*, 45

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935122019028>

<https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>

https://pure.unamur.be/ws/portalfiles/portal/87574483/MineN_Memoire.pdf

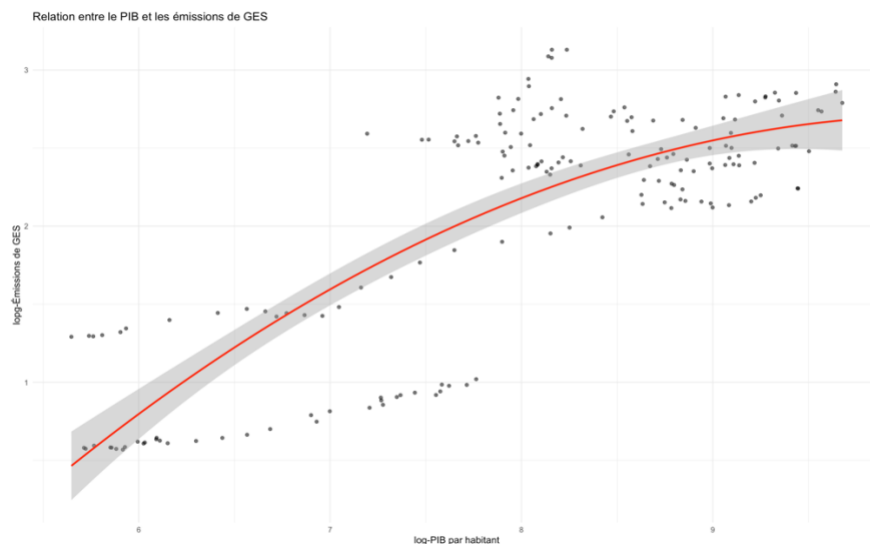
https://mpira.ub.uni-muenchen.de/32382/1/colloque_isg2009.pdf

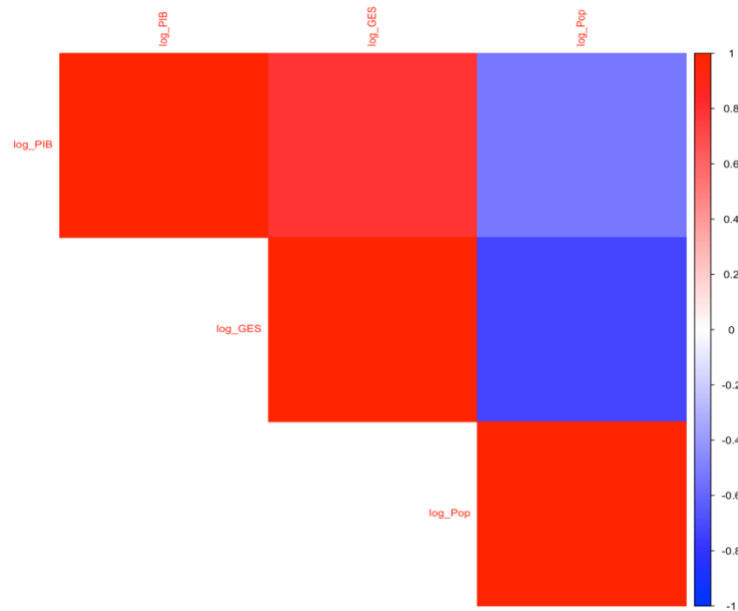
<https://geoconfluences.ens-lyon.fr/actualites/veille/breves/elargissement-brics-2024>

<https://www.banque-france.fr/fr/publications-et-statistiques/publications/elargissement-des-brics-quelles-consequences-potentielles-pour-leconomie-mondiale>

<https://reporterre.net/Le-mirage-de-la-croissance-ou-le>

Visualisation :





Code R :

```

---
title: "Econométrie des données de Panel"
author: "CORBARI Ugo"
date: "2025-01-10"
output: html_document
---
## Importation des données

```{r}

library(plm)
library(dplyr)
library(ggplot2)
library(tidyr)
library("readxl")
library(lmtest)
library(stargazer)
library(nlme)
library(corrplot)
GES <- read_excel("/Users/ugocorbari/Desktop/GES.cap.xlsx")
PIB <- read_excel("/Users/ugocorbari/Desktop/Pib.cap.BRICS.xlsx")
```

## Ajustement des formats des bases

```{r}

```



```

Restructurer les données PIB
PIB.modif <- PIB %>%
 pivot_longer(
 cols = -Pays,
 names_to = "Year",
 values_to = "GDP.cap"
)

PIB.modif <- PIB.modif %>%
 mutate(
 Year = as.integer(Year),
 GDP.cap = as.numeric(gsub(",", ".", GDP.cap))
)

colnames(PIB.modif) <- c("Entity", "Year", "GDP.cap")

PIB.modif <- PIB.modif %>%
 mutate(
 Entity = as.character(Entity),
 Year = as.integer(Year)
)

GES <- GES %>%
 mutate(
 Entity = as.character(Entity),
 Year = as.integer(Year)
)

Fusionner les bases PIB et GES
Data <- PIB.modif %>%
 left_join(GES, by = c("Entity", "Year"))

Exclure l'année 2023 car nos données de populations ne vont que jusqu'en 2022
Data <- Data %>%
 filter(Year != 2023)

Exclure les années entre 1960 et 1987 pour éviter les NA
Data <- Data %>%
 filter(!(Year >= 1960 & Year <= 1987))

Vérifier le résultat
head(Data)

Calcul du coefficient de corrélation entre GES.cap et GDP.cap

```

```

correlation_GES_GDP <- cor(Data$GES.cap, Data$GDP.cap, use = "complete.obs", method =
"pearson")
print(correlation_GES_GDP)

...

Statistiques descriptives

```{r}

# Calcul des statistiques descriptives
stats_descriptives <- Data %>%
  group_by(Entity) %>%
  summarise(
    Minimum_GDP = min(GDP.cap, na.rm = TRUE),
    Moyenne_GDP = mean(GDP.cap, na.rm = TRUE),
    Maximum_GDP = max(GDP.cap, na.rm = TRUE),
    Ecart_Type_GDP = sd(GDP.cap, na.rm = TRUE),

    Minimum_GES = min(GES.cap, na.rm = TRUE),
    Moyenne_GES = mean(GES.cap, na.rm = TRUE),
    Maximum_GES = max(GES.cap, na.rm = TRUE),
    Ecart_Type_GES = sd(GES.cap, na.rm = TRUE),

    Minimum_Pop = min(Pop, na.rm = TRUE),
    Moyenne_Pop = mean(Pop, na.rm = TRUE),
    Maximum_Pop = max(Pop, na.rm = TRUE),
    Ecart_Type_Pop = sd(Pop, na.rm = TRUE)
  ) %>%
  ungroup()

# Réorganiser les données pour avoir les statistiques en colonnes
stats_long <- stats_descriptives %>%
  pivot_longer(
    cols = -Entity,
    names_to = c("Variable", "Statistique"),
    names_pattern = "(.*)_(.*)"
  ) %>%
  rename(Pays = Entity) # Renommer Entity en Pays

# Changement du format
stats_wide <- stats_long %>%
  pivot_wider(
    names_from = Statistique,
    values_from = value
  ) %>%

```

```

    arrange(Pays, Variable)

# Afficher le tableau final
print(stats_wide)

...

# Création des modèles

```{r}

Data$log_GES <- log(Data$GES.cap)
Data$log_PIB <- log(Data$GDP.cap)
Data$log_Pop <- log(Data$Pop)

model_MCO <- lm(log_GES ~ log_PIB + I(log_PIB^2) + log_Pop, data = Data)

model_GLS <- gls(log_GES ~ log_PIB + I(log_PIB^2) + log_Pop,
 data = Data,
 method = "REML")

Modèle à Effets Fixes (FE)
model_FE <- plm(log_GES ~ log_PIB + I(log_PIB^2) + log_Pop, data = Data, model = "within")

Modèle à Effets Aléatoires (RE)
model_RE <- plm(log_GES ~ log_PIB + I(log_PIB^2) + log_Pop, data = Data, model =
"random")

summary(model_MCO)
summary(model_GLS)
summary(model_FE)
summary(model_RE)

...

Tests sur les données

```{r}

# Calcul de la matrice de corrélation
cor_matrix <- cor(Data[, c("log_PIB", "log_GES", "log_Pop")], use = "complete.obs")
# Visualisation avec un corplot
corrplot(cor_matrix, method = "color", type = "upper", tl.cex = 0.8, col =
colorRampPalette(c("blue", "white", "red"))(200))

...

```

```

```{r}
ggplot(Data, aes(x = log_PIB, y = log_GES)) +
 geom_point(alpha = 0.6) +
 geom_smooth(method = "lm", formula = y ~ poly(x, 2), col = "red") +
 labs(title = "Relation entre le PIB et les émissions de GES",
 x = "log-PIB par habitant",
 y = "logg-Émissions de GES") +
 theme_minimal()

```

## Tests sur les modèles
```{r}
Test de Breusch-Pagan
bptest(model_MCO)
bptest(model_RE)
bptest(model_FE)
```

## Ttableau final

```{r}

library(texreg)

Créer un tableau comparatif des résultats des trois modèles
Créer un tableau comparatif des résultats des trois modèles
screenreg(
 list("MCO" = model_MCO, "Effets Fixes" = model_FE, "Effets Aléatoires" = model_RE,
 "GLS" = model_GLS),
 custom.model.names = c("MCO", "Effets Fixes", "Effets Aléatoires", "GLS")
)

Test de Hausman pour comparer les modèles FE et RE
hausman_test <- phtest(model_FE, model_RE)

Afficher le résultat du test de Hausman
hausman_test

```

```