

## ***Les facteurs explicatifs des émissions de CO<sub>2</sub>***

Depuis plusieurs décennies l'Homme s'intéresse au réchauffement climatique et aux répercussions qu'il aura sur notre planète. Dans une société où l'on mesure de plus en plus l'empreinte carbone de chaque objet, de chaque déplacement, de chaque être, le choix de minimiser cette dernière est un débat crucial pour son avenir. La recherche constante d'une croissance économique depuis la révolution industrielle a entraîné une industrialisation massive des économies, majoritairement traduites par une augmentation considérable de la demande en énergie, et donc des émissions de CO<sub>2</sub> responsables du réchauffement climatique.

De nombreuses mesures sont continuellement mises en place afin de réduire ces émissions. Il y a des mesures à l'échelle microéconomique, qui viennent changer les habitudes des consommateurs. Ce sont par exemple le choix des transports publics, de produits locaux etc. D'autres mesures, plus macroéconomiques, viennent tenter d'apporter des modifications dans l'activité économique générale du pays. C'est par exemple le choix d'une production d'énergie bas carbone ou renouvelable afin de progressivement transiter vers une sobriété énergétique. D'un autre côté, ces choix macroéconomiques ne sont pour certains pas en faveur de la croissance économique du pays et seules les économies les plus avancées peuvent se le permettre, étant donné leurs niveaux de vies stabilisés.

L'objectif de ce papier est d'évaluer les facteurs explicatifs des émissions de CO<sub>2</sub> et de comparer le poids de ces derniers sur différents types d'économies. Pour ce faire, nous allons dans une première section passer en revue la littérature existante sur ce sujet afin de choisir nos variables explicatives. Ensuite une analyse économétrique sera réalisée afin de proposer et estimer un modèle reliant les émissions de CO<sub>2</sub> avec les variables explicatives choisies. L'interprétation des résultats du modèle se fera dans une troisième partie pour ensuite finir sur une discussion des limites et améliorations possibles du modèle.

### ***1. Revue de littérature et choix des variables explicatives***

La majorité des auteurs tendent à dire que l'activité économique est le rôle primordial dans le calcul des émissions de CO<sub>2</sub>. Il y a notamment Ellerman, Convery et de Perthuis (2010) qui montrent au travers d'un chapitre sur le prix du carbone que des restrictions sur les échanges sont à l'origine de la baisse des émissions de CO<sub>2</sub>. Ils illustrent leurs propos avec l'UE et de sa mise en place d'un système d'échange de quotas de gaz à effet de serre (EU ETS) qui lui a permis de réduire fortement ses émissions. En plus de cette régulation de l'activité économique, ces mêmes auteurs démontrent que la présence d'autres facteurs tels que les conditions météorologiques, les prix de l'énergie et les coûts marginaux d'abattement des émissions sont à l'origine d'une partie de l'explication de celle-ci. D'autres tels que McGuinness et Ellerman (2008), ainsi que Delarue (2008) privilégient indirectement le poids du nombre de centrales thermiques dans un pays. En effet, ces auteurs montrent que le dilemme entre production à bas coût et production bas carbone n'a pas les mêmes retombées sur le nombre d'émissions produites ainsi que sur le prix de ces émissions. Certains auteurs vont jusqu'à montrer l'importance de la croissance démographique dans l'explication des émissions. C'est le cas de York (2007) qui démontre que l'augmentation de la population va entraîner une augmentation de la consommation d'énergie et donc des émissions de CO<sub>2</sub>.

Le choix des variables explicatives a donc été fait en fonction des causes communément admises dans la littérature académique. La première variable explicative étant le PIB/habitant, elle retrace l'activité économique d'un pays étudié. En se basant sur les propos d'Ellerman utilisant comme variable de conditions climatiques, l'évolution de la température moyenne par rapport à la normale a

été retenue. Enfin comme dernière variable explicative et pour s'appuyer sur les travaux de York, le taux de croissance de la population par année a été choisie.

## *II. Modèle et résultats*

Le modèle choisi est un modèle de régression multiple avec des séries à fréquences annuelles couvrant la période allant de 1961 à 2021 pour un total de 61 observations. Il sera estimé pour l'Autriche pour ensuite être comparé à 3 autres pays aux économies différentes. Les 3 autres pays retenues sont la Chine, l'Inde et l'Irlande. L'Autriche représente un pays développé qui a une offre d'énergie primaire assez diversifiée avec une production majoritairement hydraulique, faisant face à des changements de températures conséquents. La Chine, pays émergent avec le plus d'émissions de CO<sub>2</sub> en volume dans le monde et qui a une production majoritairement hydraulique et des climats variés. L'Inde est présentée comme un pays émergent à forte croissance démographique et avec une production d'énergie presque exclusivement thermique. L'Irlande comme pays développé, paradis fiscal, intéressant à comparer avec l'Autriche.

$$Y_i = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varepsilon_i$$

*$Y_i$  : Les émissions de CO<sup>2</sup> en tonnes par habitant*

*$X_1$  : Le PIB par habitant (en dollar constant)*

*$X_2$  : La variation moyenne de la température par rapport à la normale*

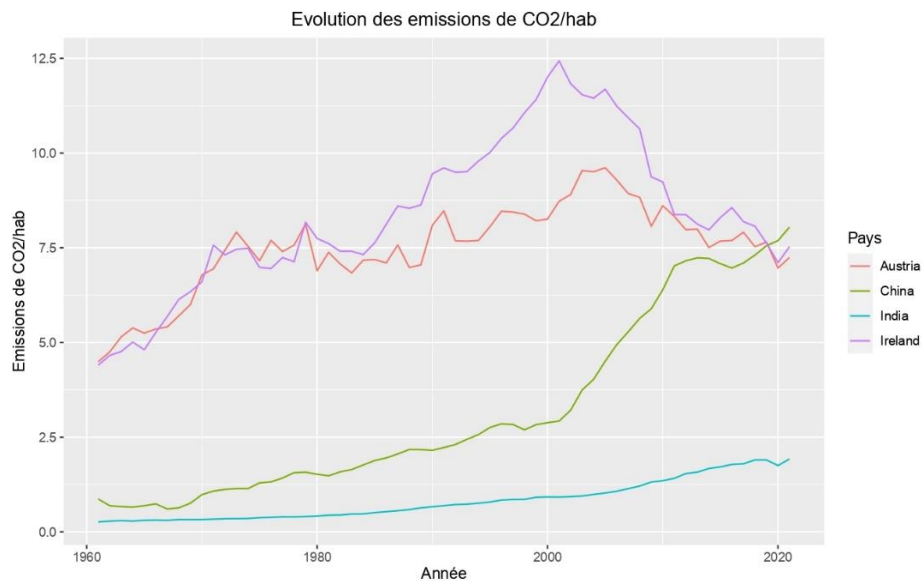
*$X_3$  : Le taux de croissance de la population*

*$\beta_1 \beta_2 \beta_3$  : Les coefficients de régression partiels, ce sont les paramètres à estimer*

*$\varepsilon_i$  : Le terme d'erreur*

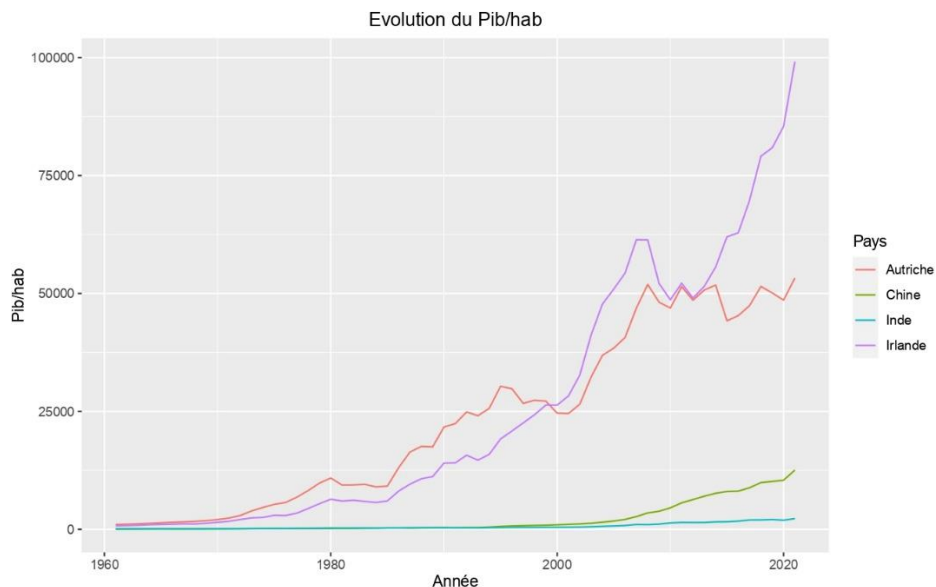
Pour  $Y_i$ , la variable expliquée, les données proviennent de Global Carbon Project, un organisme indépendant qui quantifie les émissions mondiales de gaz à effet de serre. Les données de la première et troisième variables explicatives  $X_1$  et  $X_3$  sont tirées de la Banque Mondiale et de son rapport de 2021. Enfin celles de  $X_2$  proviennent du Fonds Monétaire International.

Avant d'estimer le modèle, une structuration de l'information comprise dans les jeux de données à l'aide de statistiques descriptives s'avère intéressante pour forger une première intuition sur les relations entre les pays ainsi que l'évolution des différentes variables utilisées dans le modèle.



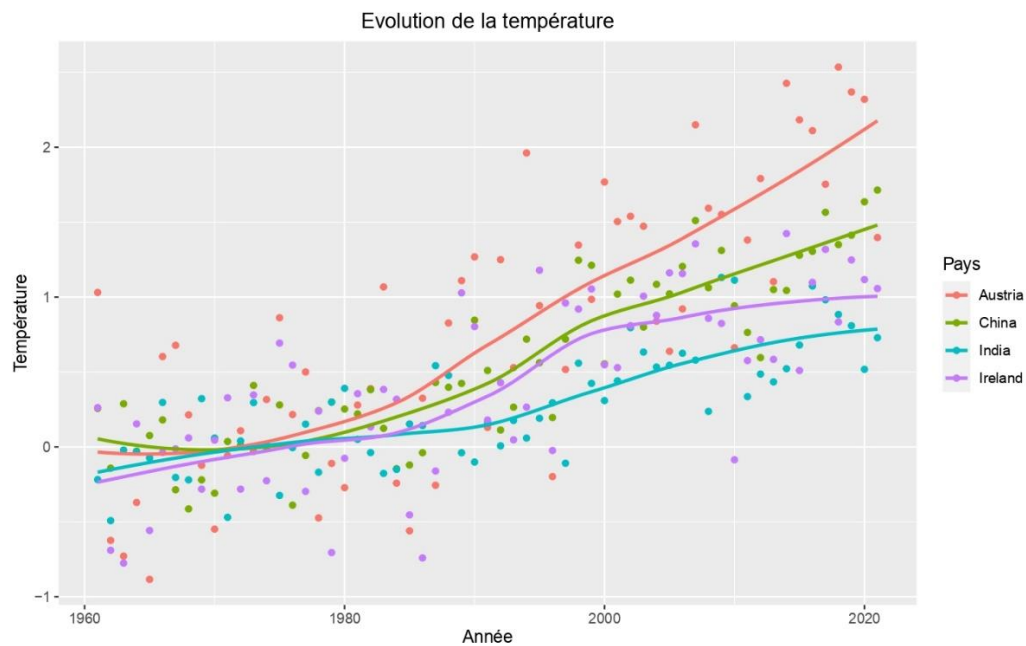
On constate que les émissions de CO<sub>2</sub>/habitant de l'Autriche et l'Irlande, les deux pays développés, semblent positivement corrélées jusqu'en 2000, puis négativement ensuite. Elles évoluent dans le même sens et sont supérieures à celles des pays émergents.

Les émissions de CO<sub>2</sub>/habitant en Chine et en Inde sont beaucoup moins volatiles que pour l'Autriche et l'Irlande. On observe de plus une tendance générale à la hausse sur toute la période analysée. Les deux pays émergents semblent moins corrélés entre eux que les deux pays développés.



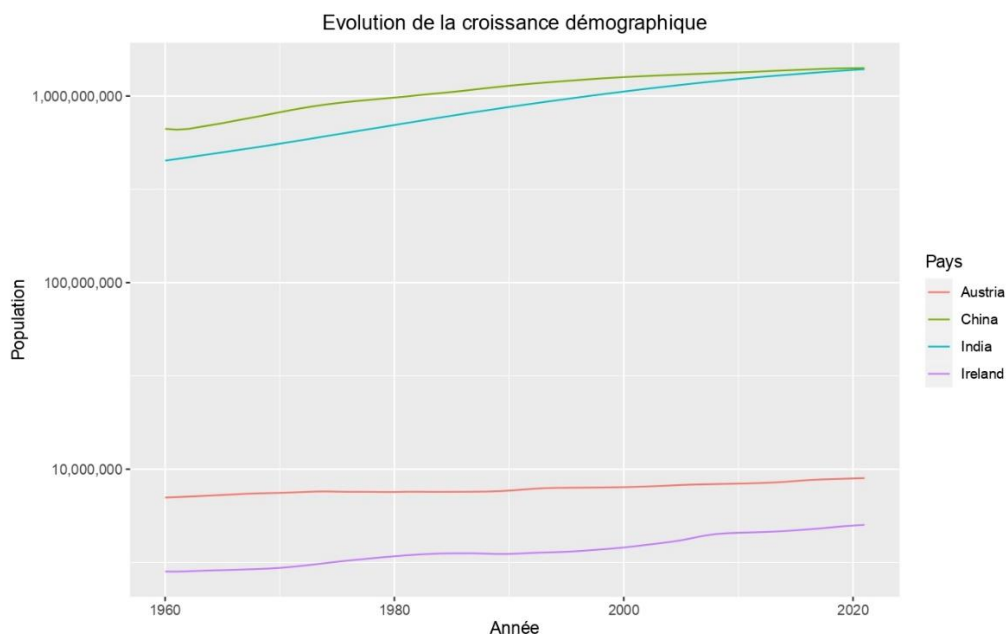
Du point de vue du PIB/hab, l'Autriche et l'Irlande semblent à nouveau corrélés positivement. Les deux pays ont une tendance à la hausse et sont plus volatiles que la Chine et l'Inde. On observe une forte augmentation du PIB/hab de l'Irlande à partir de 2010. Cela fait suite à l'implantation des sièges sociaux des GAFAM qui profitent de la politique fiscale avantageuse du pays.

La Chine et l'Inde ont un PIB/hab extrêmement stable en comparaison aux deux autres pays. Des différences d'échelle par rapport à la monnaie et de niveau de vie sont peut-être à l'origine de cette stabilité. On peut supposer que si l'on regardait le PIB par habitant en parité de pouvoir d'achat, la stabilité serait compromise. On observe cependant une augmentation de celui de la Chine à partir du début des années 2000.



A l'aide d'une régression polynomiale, on trace une tendance de l'évolution de la température par rapport à la moyenne.

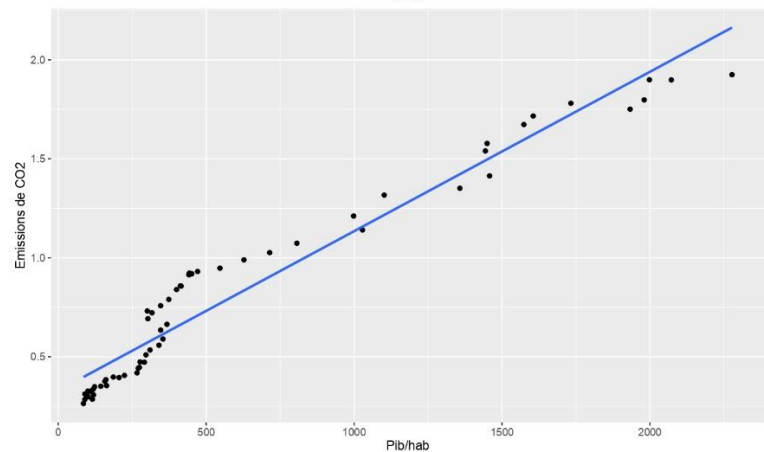
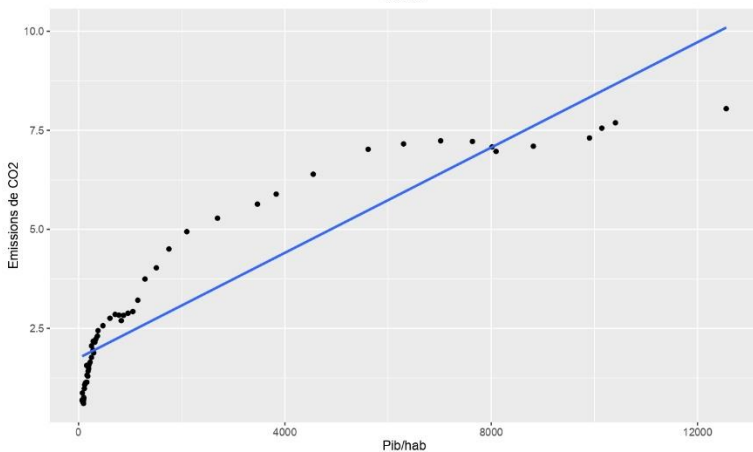
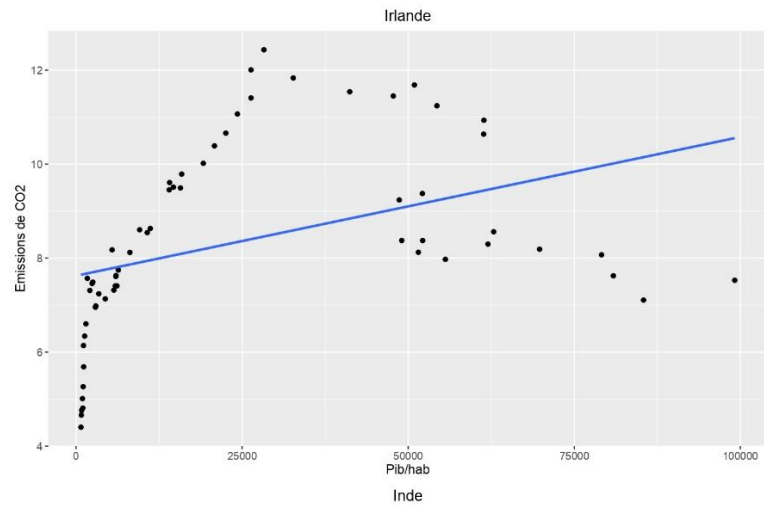
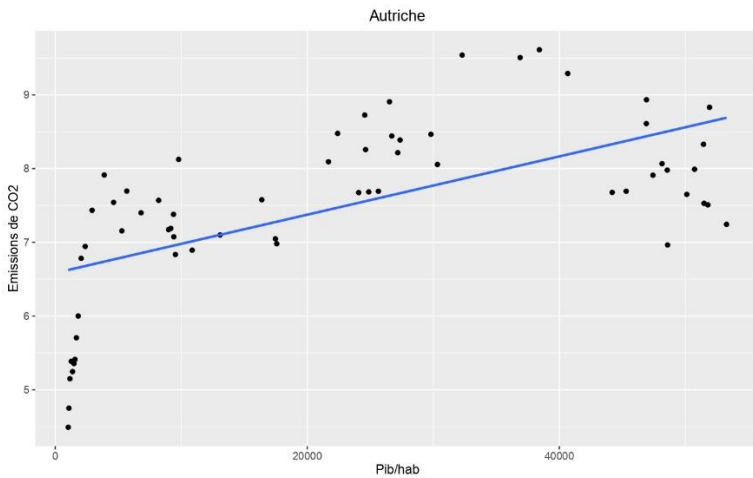
On constate une tendance générale à la hausse pour tous les pays. Les 4 variables semblent corrélées positivement. La température moyenne ne fait qu'augmenter pour les 4 pays depuis les années 70. On constate que l'augmentation est précoce et plus forte en Autriche que dans les autres pays.



Une échelle logarithmique est utilisée pour l'axe des ordonnées afin d'avoir une meilleure lisibilité des données.

On constate une très faible augmentation de la croissance démographique en Autriche et en Irlande comparé à celle de l'Inde et de la Chine, qui ont vu leurs populations presque doubler en 60 ans. Cela fait sens si l'on estime que l'Inde et la Chine, en tant que pays émergents, n'ont pas fini leur transition démographique.

On regarde maintenant la relation entre notre variable explicative et le PIB/hab. Les deux axes sont exprimés dans des échelles différentes pour chaque pays, de manière à mieux s'ajuster visuellement.



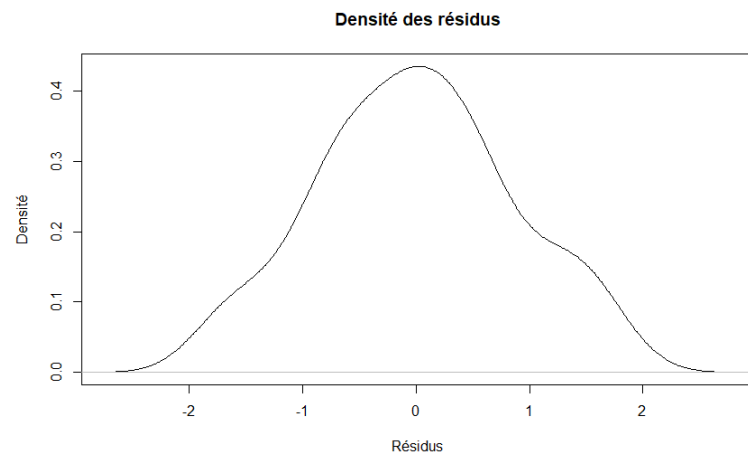
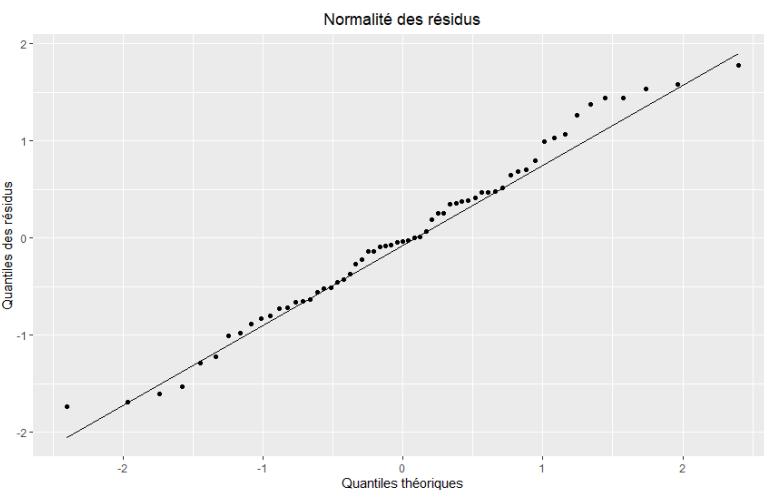
On remarque une relation positive et croissante pour les 4 pays. Les émissions de  $\text{CO}_2$  par habitant sont corrélées positivement au PIB par habitant. La corrélation semble être de moins en moins forte au fur et à mesure que le PIB par habitant augmente. En effet, pour l'Autriche et l'Irlande, lorsque le PIB/hab atteint une certaine valeur, il ne semble plus être corrélé aux émissions par habitant.

A l'aide des statistiques descriptives, on peut donc émettre l'hypothèse qu'il y a deux groupes distincts au sein de ces 4 pays : les pays développés et les pays émergents. En effet, leurs variables semblent corrélées entre elles et évoluent dans le même sens.

Dependant variable : Emissions de CO2/hab				
Régression pour l'Autriche				
	(1)	(2)	(3)	(4)
Pib/hab	0.00005*** (0.00001)	0.00004*** (0.00001)		0.00004*** (0.00001)
Température	-0.161 (0.202)		0.605*** (0.157)	
Population	-0.874** (0.367)	-0.912** (0.362)	-0.760* (0.435)	
Constante	6.826*** (0.214)	6.852*** (0.211)	7.319*** (0.227)	6.584*** (0.191)
Observations	61	61	61	61
R <sup>2</sup>	0.452	0.446	0.210	0.385
Adjusted R <sup>2</sup>	0.423	0.427	0.183	0.375
Residual Std. Error	0.885 (df = 57)	0.882 (df = 58)	1.053 (df = 58)	0.921 (df = 59)
F Statistic	15.657*** (df = 3; 57)	23.316*** (df = 2; 58)	7.730*** (df = 2; 58)	36.960*** (df = 1; 59)

Note:

\*p<0.1; \*\*p<0.05; \*\*\*p<0.01



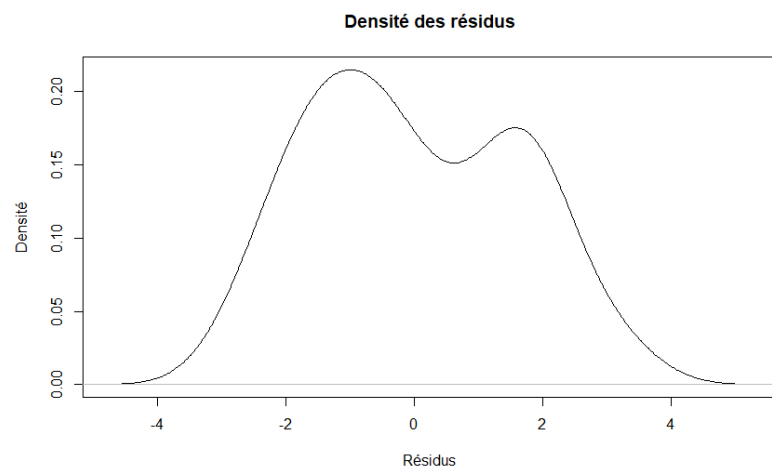
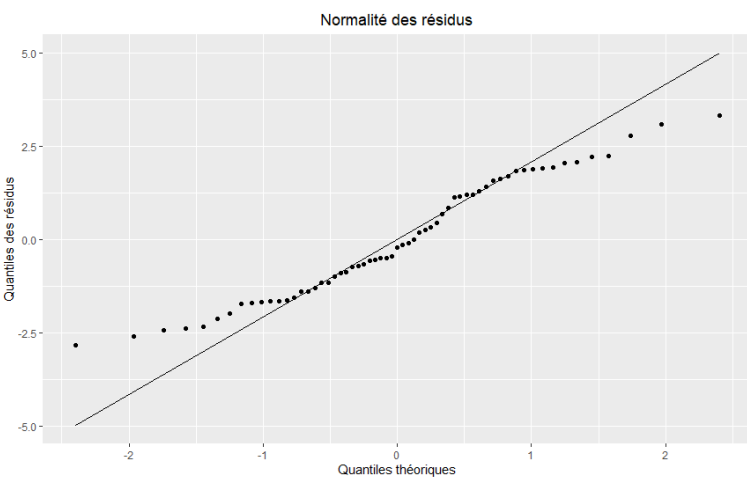
Dans notre modèle (1), les coefficients associés aux PIB/hab et au taux de croissance de la population sont significatifs au seuil statistique de 5%. Les deux variables contribuent donc à l'explication des émissions de CO<sub>2</sub>/hab. Pour le coefficient lié à la température, on ne rejette pas l'hypothèse nulle, elle ne contribue pas à l'explication des émissions.

En regardant la valeur du coefficient de détermination  $R^2$ , on constate que 45.2% de la variation des émissions de CO<sub>2</sub> autrichienne est expliqué par le modèle.

Si l'on compare la significativité des coefficients associés aux variables PIB/hab et population, et plus précisément leurs t de Student, on constate que  $|t_{\beta_1}| > |t_{\beta_3}|$ . On peut donc conclure que le PIB/hab a plus d'influence sur les émissions de CO<sub>2</sub> que le taux de croissance de la population.

En comparant les modèles avec le coefficient de détermination ajusté  $\bar{R}^2$ , on remarque que le modèle (1) est celui qui explique le mieux les variations des émissions, mais que le modèle (2), sans la variable température, explique presque autant de variance de  $Y_i$ . Cela fait sens car, comme vu plus haut, le coefficient associé à la variable de température n'est pas significativement différent de 0.

Dependant variable : Emissions de CO2/hab				
Régression pour l'Irlande				
	(1)	(2)	(3)	(4)
Pib/hab	-0.00000 (0.00001)	0.00002** (0.00001)		0.00003*** (0.00001)
Température	1.490*** (0.527)		1.477*** (0.394)	
Population	0.839** (0.346)	1.058*** (0.356)	0.838** (0.341)	
Constante	6.977*** (0.386)	6.851*** (0.406)	6.972*** (0.367)	7.624*** (0.332)
Observations	61	61	61	61
R <sup>2</sup>	0.356	0.266	0.356	0.154
Adjusted R <sup>2</sup>	0.322	0.240	0.334	0.140
Residual Std. Error	1.658 (df = 57)	1.756 (df = 58)	1.644 (df = 58)	1.868 (df = 59)
F Statistic	10.502*** (df = 3; 57)	10.491*** (df = 2; 58)	16.028*** (df = 2; 58)	10.748*** (df = 1; 59)
<i>Note:</i>			*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01	

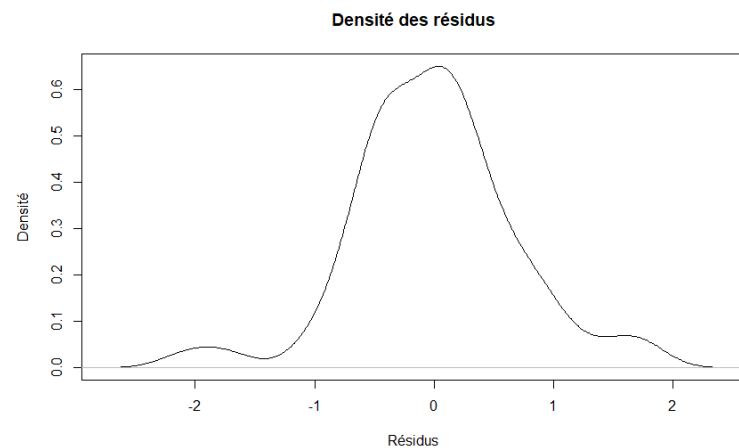
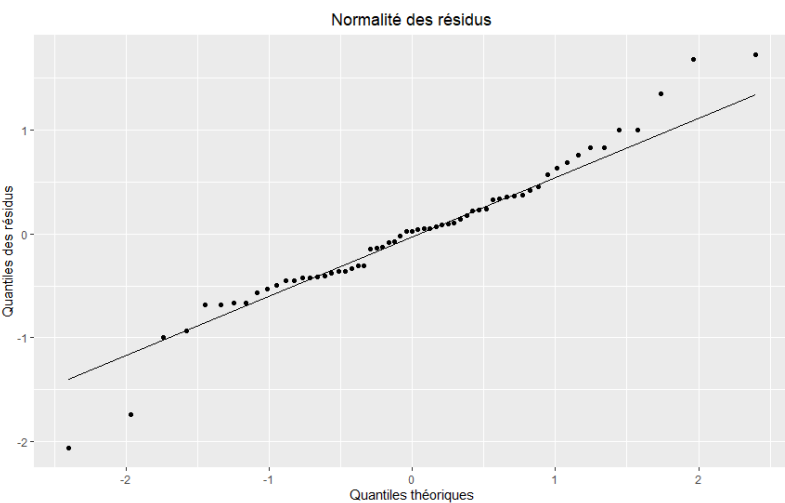


Ce qui est le plus flagrant d'entrée, c'est que l'hypothèse de normalité des résidus n'est pas respectée. Cependant, au vu du nombre d'observations, les propriétés asymptotiques du modèle de régression linéaire nous permettent tout de même d'estimer les paramètres.

On remarque que contrairement à l'Autriche, le coefficient associé au PIB/hab n'est pas significatif, il n'explique donc pas les émissions de l'Irlande. Cela se confirme en regardant le coefficient de détermination ajusté  $\bar{R}^2$  du modèle (3) qui est presque égal à celui du modèle (1).

$\beta_2$  et  $\beta_3$  sont positifs et significatifs au seuil de 5%, il y a donc, toutes choses égales par ailleurs, une relation positive et croissante entre la température et la population avec les émissions. D'un autre côté, le modèle ne semble pas correctement spécifié. En effet, le coefficient de détermination  $R^2$  est égal à 0.356. Il reste donc 65% de la variance des émissions/hab qui n'est pas expliqué par le modèle.

Dependant variable : Emissions de CO2/hab				
Régression pour la Chine				
	(1)	(2)	(3)	(4)
Pib/hab	0.0005*** (0.00004)	0.001*** (0.00004)		0.001*** (0.00004)
Température	0.999*** (0.272)		2.846*** (0.405)	
Population	-0.461*** (0.159)	-0.769*** (0.149)	-0.610** (0.290)	
Constante	2.172*** (0.310)	2.926*** (0.256)	2.334*** (0.566)	1.749*** (0.140)
Observations	61	61	61	61
R <sup>2</sup>	0.918	0.899	0.722	0.852
Adjusted R <sup>2</sup>	0.914	0.895	0.712	0.850
Residual Std. Error	0.696 (df = 57)	0.768 (df = 58)	1.274 (df = 58)	0.920 (df = 59)
F Statistic	213.639*** (df = 3; 57)	257.998*** (df = 2; 58)	75.150*** (df = 2; 58)	340.330*** (df = 1; 59)
Note:			*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01	



Pour la Chine, les coefficients associés aux variables du modèle sont tous significatifs et jouent donc un rôle dans l'explication du modèle. En regardant le coefficient  $\beta_3$ , on remarque que l'effet marginale d'une augmentation de la température d'1% en Chine est une hausse des émissions de CO<sub>2</sub>/hab d'à peu près 1%.

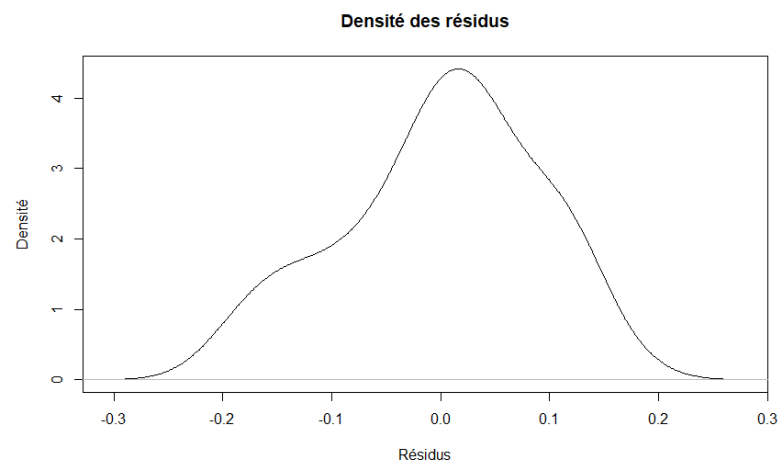
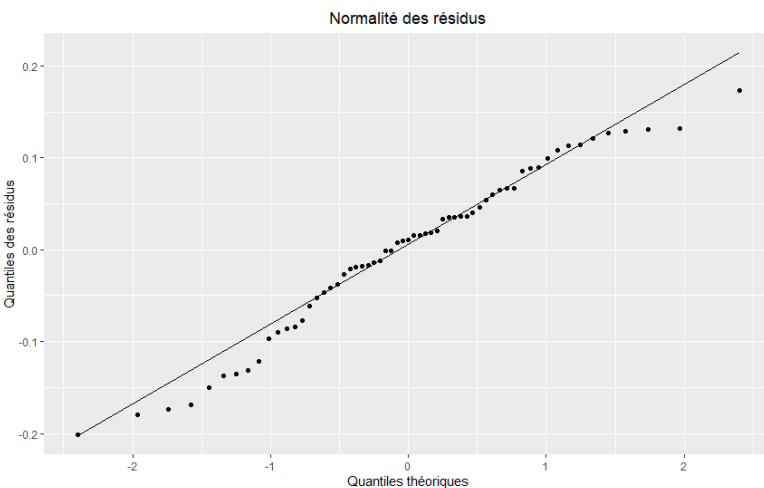
Contrairement à l'Autriche et à l'Irlande, le modèle semble correctement spécifié. En regardant le coefficient de détermination on constate en effet que le modèle explique 91.8% de la variation des émissions de CO<sub>2</sub>/hab en Chine.



Dependant variable : Emissions de CO2/hab				
	Régression pour l'Inde			
	(1)	(2)	(3)	(4)
Pib/hab	0.0004*** (0.0001)	0.0005*** (0.0001)		0.001*** (0.00003)
Température	0.115** (0.047)		0.163** (0.066)	
Population	-0.469*** (0.080)	-0.518*** (0.081)	-1.007*** (0.057)	
Constante	1.399*** (0.184)	1.511*** (0.186)	2.660*** (0.121)	0.329*** (0.023)
Observations	61	61	61	61
R <sup>2</sup>	0.969	0.966	0.937	0.942
Adjusted R <sup>2</sup>	0.967	0.965	0.935	0.941
Residual Std. Error	0.093 (df = 57)	0.097 (df = 58)	0.131 (df = 58)	0.125 (df = 59)
F Statistic	595.561*** (df = 3; 57)	819.324*** (df = 2; 58)	429.549*** (df = 2; 58)	955.425*** (df = 1; 59)

Note:

\*p<0.1; \*\*p<0.05; \*\*\*p<0.01



Tout comme pour la Chine, le PIB/hab, la température et le taux de croissance de la population en Inde sont significatifs au seuil de 5% et jouent donc un rôle dans l'explication des émissions de CO<sub>2</sub>/hab.

Le coefficient de détermination ajusté du modèle (1) est celui qui a la valeur la plus proche de 1. En en conclut que le modèle (1) est à privilégier dans la mesure où il explique un plus fort pourcentage de variance de  $Y_i$ .

### *III. Interprétation et discussion*

Après avoir passé en revue le modèle pour les 4 pays, on peut aisément les diviser en 2 catégories : pays émergents et pays développés. Cela vient confirmer notre hypothèse émise lors des statistiques descriptives. Pour la Chine comme pour l'Inde, les 3 variables jouent un rôle déterminant dans l'explication des émissions de CO<sub>2</sub> par habitant. De plus, le poids de ces 3 même variables semble y être beaucoup plus important que pour l'Autriche et l'Irlande. Les coefficients de détermination ajustés des deux pays émergents sont en effet supérieurs à 0.9 tandis qu'ils ne dépassent pas les 50% d'explication de la variance des émissions pour les deux pays développés. Le modèle semble donc correctement spécifié pour certains types d'économies.

D'un autre côté, le PIB par habitant est significatif dans l'explication des émissions par habitant pour tous les pays sauf l'Irlande. Cela est cohérent avec notre analyse des statistiques descriptives où l'on observait une hausse drastique et anormale de ce dernier à partir des années 2010. En restreignant le modèle à la période 1961-2010, on remarque que le coefficient associé au PIB/hab devient significatif au seuil de 5% ( $\beta_1 = 0.0004732$  et  $R^2 = 0.621$ ). On en conclut donc que le PIB/hab pour ce pays, sur la période 1961-2010, n'est pas une bonne variable explicative. Pour un pays tel que l'Irlande, souvent catégorisé comme paradis fiscal, l'utilisation du Revenu National Brut (RNB) serait plus intéressante. Le RNB permet en effet de passer outre les productions, et donc émissions, importées pour des raisons fiscales.

De manière plus générale, on constate qu'à partir d'un certain seuil de PIB par habitant, le rôle de cette dernière devient de moins en moins significatif dans l'explication des émissions par habitant. Cette analyse vient confirmer les nuages de points entre PIB/hab et émissions de CO<sub>2</sub>/hab vu plus haut, sur lesquels on voit que les émissions et le PIB sont très corrélés lorsque le PIB/hab est faible et qu'à partir d'un certain niveau de PIB/hab, la corrélation semble être nulle. Cela fait sens si l'on considère l'utilité des habitants d'un pays. Le gain d'utilité d'un habitant à niveau de vie faible d'augmenter sa quantité de travail, et donc d'augmenter l'activité économique de son pays et intuitivement de produire plus de CO<sub>2</sub>, est supérieur à celui d'un habitant à niveau de vie plus élevé étant donné que ce dernier est proche d'un maximum théorique de son niveau de vie.

Du point de vue de la variable température, on se rend compte que cette dernière, bien qu'elle soit associée à un coefficient significatif pour 3 des 4 pays, comporte des biais. Les répercussions d'une hausse de la température ne seront pas les mêmes dans un pays à climat tropical que dans un pays à climat polaire. L'augmentation de la température dans un climat tempéré tel que l'Autriche entraînera une baisse de la production d'énergie dû à la baisse de la nécessité de chauffage, tandis que pour l'Inde qui a un climat beaucoup plus chaud, les dépenses énergétiques en climatisation augmenteront. De plus, la taille des pays ajoute un autre biais à notre variable. L'Inde possède, selon la classification de Köppen, 6 zones climatiques. Dans chacune de ces zones, l'effet de l'augmentation de la température sur les émissions sera différent et aura tendance à être affaibli par la présence des autres zones à climat froid. Une analyse à plus petite échelle permettrait d'atténuer ce biais.

Le coefficient associé à la variable de croissance démographique est significatif pour les 4 pays ce qui nous amène à dire que le taux de croissance de la population est pertinent dans l'explication des émissions de CO<sub>2</sub> par habitant.

### *IV. Conclusion*

On peut donc conclure à l'aide de notre modèle que les propos de York sur le taux de croissance de la population ainsi que ceux de Ellerman, Convery et de Perthuis sur l'activité

économique sont vrais, les deux variables jouent un rôle dans l'explication des émissions de CO<sub>2</sub>. Les propos de McGuinness et Ellerman ainsi que ceux de Delarue sur la variable liés aux conditions météorologique ne peuvent pas être vérifiés par notre modèle.

La comparaison des 4 pays nous montre donc que le modèle est plus à même d'expliquer les émissions de certains types d'économies plutôt que d'autres. L'Autriche ayant un niveau de vie élevé et une transition démographique terminée, une partie de ses émissions de CO<sub>2</sub> n'est pas expliquée.

Bibliographie :

Delarue, E., D. Ellerman, and W. D'haeseleer (2008): *Short-term CO2 Abatement in 32 the European Power Sector*, University of Leuven, Belgium, and MIT, Massachusetts, USA.

Ellerman D., Convery, F. & de Perthuis, C. (2010), *Le prix du carbone – Les enseignements du marché européen du CO2*, Pearson

McGuinness, M. & Ellerman, A. D. (2008), *CO2 abatement in the UK power sector: evidence from EU ETS trial period*, Working paper n° 2008-010. Boston, Center for Energy and Environmental Policy Research, MIT

York R. (2007), *Demographic trends and energy consumption in European Union Nations, 1960- 2025*. Social Science Research, 36(3), pp. 855–872