

# Quelles sont les politiques à privilégier pour réduire les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur manufacturier français ?

PEZENNEC Gabriel & KASMI Ismail

---

## Sommaire :

◦ Introduction et motivations	1
◦ Description des données	3
◦ Statistiques descriptives	4
◦ Spécification du modèle économétrique	8
◦ Estimation et interprétation des résultats	11
◦ Conclusion et limites	16

---

2 0 2 3 - 2 0 2 4

# I. Introduction et motivation

Le 16 juillet 2021, l'usine sidérurgique ArcelorMittal a été condamnée pour pollution atmosphérique, en raison d'un dépassement de seuil d'oxyde d'azote, de dioxyde de soufre et de particules fines, une première pour une usine sidérurgique en France<sup>1</sup>. Bien au-delà des normes qui ont été mises en place, à l'image de la précédente, les États ont instauré une multitude de politiques, plus ou moins directes, pour pouvoir lutter contre le réchauffement climatique. On en dénombre plus d'une dizaine se répartissant entre taxes, normes ou subventions, mais encore – par une classification plus formelle – entre politiques marchandes, politiques non-marchandes et politiques de soutien technologique.

Au cours des deux dernières décennies et en moyenne dans les pays de l'OCDE, c'est la rigueur des instruments politiques<sup>2</sup> non fondés sur le marché qui a le plus augmenté, suivie par les politiques de soutien technologique et les politiques fondées sur le marché. Cependant, au cours de cette dernière décennie, le niveau des politiques de soutien technologique s'est affaibli, ce qui fait craindre un déclin des incitations à innover dans les technologies propres. Cela est d'autant plus important que l'innovation verte est capitale pour la réduction des coûts potentiels à court terme des politiques climatiques et que diverses études ont souligné la nécessité de développer un ensemble de connaissances axées sur le développement durable, afin de rendre caduques les avantages technologiques des solutions actuelles basées sur les énergies carbonées<sup>3</sup>. En outre, le fait que les innovations prennent du temps – souvent des décennies – pour atteindre leurs maturités, rend urgent la relance des efforts d'innovation verte au cours de cette décennie.

Au niveau macroéconomique, il convient de noter que les dépôts de brevets verts ont un impact positif sur l'activité économique, notamment à moyen terme, qui ne se distingue pas statistiquement de celui des dépôts de brevets non verts. Cette constatation permet ainsi de croire en une croissance verte, où les innovations écologiques contribuent de manière significative à la dynamique économique sans compromettre la compétitivité. Quantitativement parlant, une analyse économétrique, s'appuyant sur des données sur les dépôts de brevets dans les pays de l'OCDE et des BRICS entre 1990 et 2019, montre qu'une augmentation des dépôts de brevets pour l'atténuation du changement climatique stimule le PIB réel : précisément, une augmentation du flux de dépôts de brevets de 7% entraîne une augmentation de 0.14% du PIB après cinq ans par rapport au scénario de référence<sup>4</sup>.

L'accord de Paris de 2015, mené par Laurent Fabius, ancien Premier ministre et ancien ministre de l'Industrie et de la Recherche, rend bien compte de la conscience des États en ces enjeux. Cette conscience aboutit à un engagement de limitation du réchauffement climatique à moins de 2°C, visant la barre des 1.5°C, et une mobilisation de 100 milliards de dollars des pays du Nord pour ceux du Sud, afin de solder leur « dette climatique »<sup>5</sup>.

<sup>1</sup> France Nature Environnement, *ArcelorMittal méditerranée condamnée : victoire pour la santé et l'environnement*

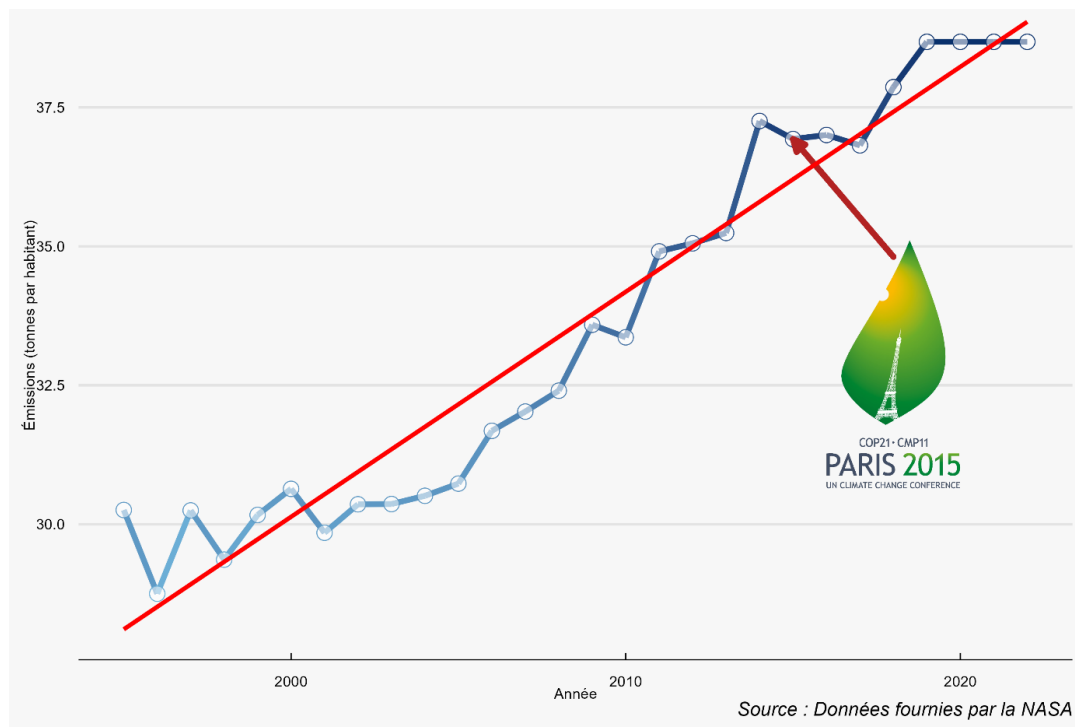
<sup>2</sup> La rigueur est définie comme la mesure dans laquelle les politiques environnementales attribuent un prix explicite ou implicite aux comportements polluants ou préjudiciables à l'environnement.

<sup>3</sup> Aghion et al., 2009

<sup>4</sup> FMI, *Innovation et diffusion vertes : politiques visant à les accélérer et impact attendu sur les performances macroéconomiques et au niveau des entreprises*, 6 novembre 2023

<sup>5</sup> Le Monde, *COP 21 : Les points clés de l'accord universel sur le climat*

Figure 1 : Evolution des émissions par habitant de GES de 1995 à 2021



Pour autant, les émissions de gaz à effet de serre (GES) par habitant (en France) continuent à augmenter, avec un taux de croissance annuel moyen de 2.4% (figure 1). Plus préoccupant encore, avec les politiques actuellement mises en œuvre, les températures moyennes mondiales devraient augmenter jusqu'à environ 2,7 °C d'ici la fin du siècle<sup>6</sup>. Dès lors, deux choix se présentent : l'augmentation quantitative des politiques environnementales ou l'amélioration qualitatives de ces dernières (sans exclure les deux à la fois).

Chaque approche politique comporte des avantages et des inconvénients, et leur efficacité dépendra étroitement des spécificités des contextes économiques, politiques et fiscaux. Par exemple, les politiques marchandes offrent une flexibilité et un potentiel d'efficacité économique en ciblant directement les bénéfices des entreprises, mais leur mise en œuvre nécessite souvent une coordination internationale pour éviter les fuites de carbone (*Displacement Hypothesis*<sup>7</sup> : la libéralisation des échanges et l'ouverture entraînent une croissance plus rapide des industries intenses en pollution dans les pays moins développés car les économies développées renforcent les régulations environnementales) et une diminution de la compétitivité. D'autre part, les politiques non-marchandes peuvent être plus directes mais peuvent entraîner des coûts de conformité élevés pour les entreprises. Le soutien technologique, bien que crucial pour surmonter les barrières à l'adoption de nouvelles technologies, exige un financement public conséquent, d'autant plus dans un contexte où la dette nationale atteint 110% du PIB<sup>8</sup>.

Ce mémoire a alors pour objectif de mieux cibler les politiques environnementales dans le secteur manufacturier, un secteur représentant 80% de la production industrielle<sup>9</sup> et la plus grande part de la pollution dans le secteur industriel depuis 1990 jusqu'au pré-covid<sup>10</sup>.

<sup>6</sup> Climate Action Tracker, 2021[6] ; GIEC, 2021[7]

<sup>7</sup> *Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey*, Soumyananda Dinda, Ecological Economics 49 (2004)

<sup>8</sup> INSEE, Comptes nationaux des administrations publiques - premiers résultats - année 2023

<sup>9</sup> INSEE, Tableau de bord de l'économie française, 2022

<sup>10</sup> CITEPA, édition 2023

## II. Description des données

Pour se faire, l'évaluation économétrique qui se fera s'engagera sur une base de données contenant l'évolution annuelle de 1990 à 2021 des variables ci-dessous :

1. Emissions des gaz à effet de serre en mégatonnes équivalent de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)<sup>11</sup>
2. Part des investissements destinés au renouvellement (R) d'équipements dans l'industrie manufacturière<sup>12</sup> (en % des investissements de l'industrie manufacturière)
3. Part des investissements destinés à l'introduction de nouveaux produits (NP) dans l'industrie manufacturière<sup>13</sup> (en % des investissements de l'industrie manufacturière)
4. Part des investissements destinés aux économies d'énergie (EE) dans l'ensemble de l'industrie<sup>14</sup> (en % des investissements de l'ensemble de l'industrie)
5. Part des investissements destinés à l'introduction de nouvelles techniques (NT) dans l'ensemble de l'industrie<sup>15</sup> (en % des investissements de l'ensemble de l'industrie)
6. Formation brute de capital fixe<sup>16</sup> (FBCF, en millions d'euros de 2014)
7. Indice de rigueur des politiques marchandes<sup>17</sup>
8. Indice de rigueur des politiques non-marchandes<sup>18</sup>
9. Indice de rigueur des politiques d'appui technique (subventions à la R&D)<sup>19</sup>
10. Pourcentage des brevets sur les technologies liés à l'environnement<sup>20</sup>
11. Taxe carbone prévue initialement et appliquée<sup>21</sup>

### *Encadré 1 : hypothèses sur les données*

- 
- La part des investissements destinés aux économies d'énergie dans l'ensemble de l'industrie est supposée identique dans l'industrie manufacturière.
  - La part des investissements destinés à l'introduction des nouvelles techniques dans l'ensemble de l'industrie est supposée identique dans l'industrie manufacturière.
  - La part des brevets verts parmi la totalité des brevets dans l'ensemble des secteurs est supposée identique dans l'industrie manufacturière, c'est-à-dire que le pourcentage de brevets verts dans le secteur manufacturier est le même que celui de l'ensemble des secteurs.
  - La taxe carbone initialement envisagée avait été suspendue à la suite des manifestations des Gilets Jaunes en 2019. Cependant, comme le démontrent plusieurs études, telle que "The Effect of Corporate Taxation on Investment and Financial Policy: Evidence from the DPAD" d'Eric Orhn, publiée dans l'American Economic Journal : Economic Policy en mai 2018, les entreprises anticipent déjà l'impact des taxes à venir, ce qui nous permet de conserver uniquement la taxe initialement prévue.
- 

<sup>11</sup> CITEPA, édition 2023

<sup>12</sup> INSEE, idBank : 1583831

<sup>13</sup> INSEE, idBank : 1583843

<sup>14</sup> INSEE, idBank : 001583829

<sup>15</sup> INSEE, idBank : 1583827

<sup>16</sup> INSEE, idBank : 010569956

<sup>17, 18, 19, 20</sup> OCDE

<sup>21</sup> EnergiesDev Consulting

Notre base de données comprend des données recueillies auprès de l'OCDE, l'INSEE et le Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique (CITEPA). Ces données ont été collectées de manière annuelle au cours de la période 1992-2020 et sont basées sur des séries temporelles. La pertinence de ces données réside dans leur dimension temporelle, leur représentativité des politiques environnementales, ainsi que dans la nature spécifique de leur type (marchandes, non-marchandes et d'appui technologique), permettant une analyse complète de la politique nationale. Par ailleurs, la décomposition des investissements en ces différentes classes (renouvellement, économie d'énergie, nouvelles techniques et nouveaux produits) permet de mieux analyser et cibler les stratégies d'investissements ayant pour but de réduire les émissions.

L'indice de rigueur des politiques non-marchandes est une agrégation de la rigueur des quatre politiques non-marchandes, à savoir : la teneur en soufre maximale du diesel, la valeur limite d'émissions de dioxyde d'azote, de soufre et des particules fines. Pour ces dernières, plus la valeur est faible, plus la politique est stricte, avec un score variant de 0 (degré de rigueur le moins élevé) à 6 (degré de rigueur le plus élevé).

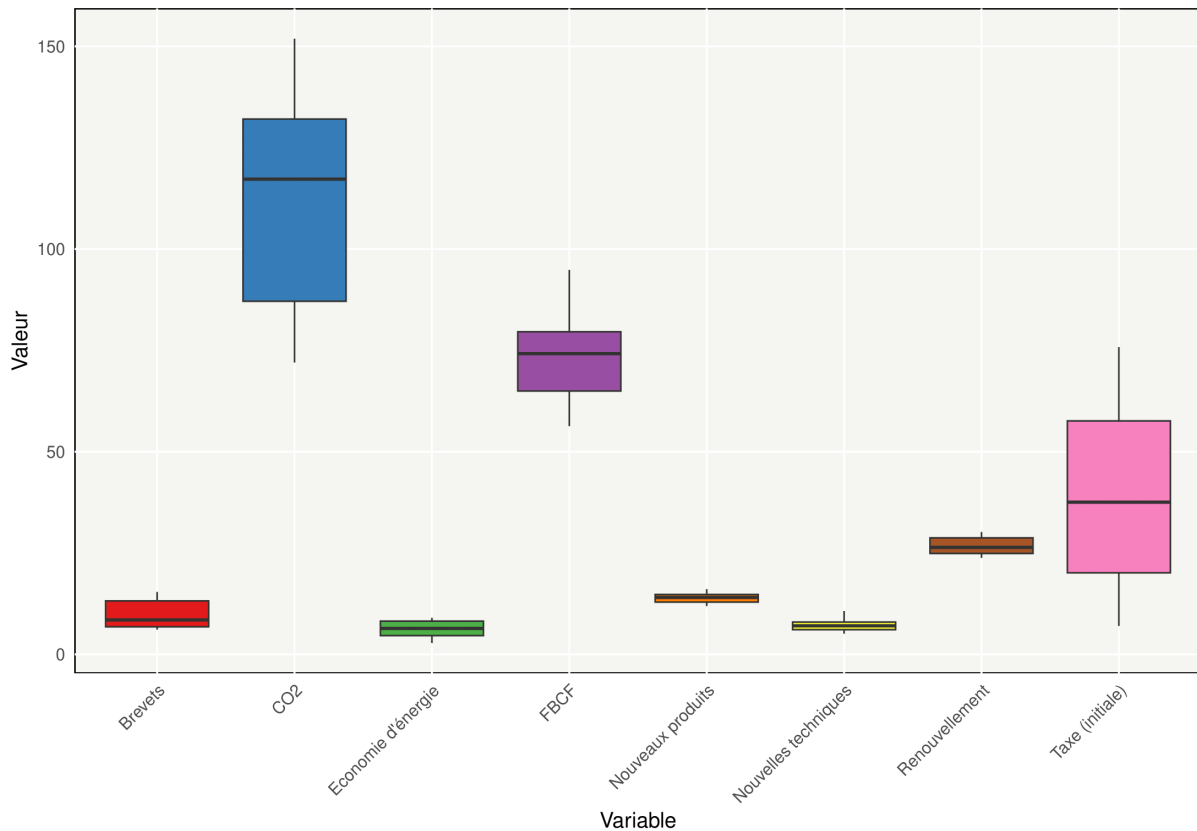
De même, l'indice de rigueur des politiques marchandes est une agrégation de la rigueur de six politiques marchandes, à savoir : les systèmes d'échange de CO<sub>2</sub>, les systèmes d'échange d'énergies renouvelables et les taxes sur le CO<sub>2</sub>, oxyde de soufre, dioxyde d'azote et diesel. Chacune de ces politiques a un score variant de 0 (degré de rigueur le moins élevé) à 6 (degré de rigueur le plus élevé). La rigueur de la taxe sur chacun des gaz à effet de serre est mesurée par le taux de taxe sur les émissions. Plus le taux est élevé, plus la politique est stricte. Les systèmes d'échange de CO<sub>2</sub> fixent des limites sur les émissions totales, autorisant les entités réglementées à échanger des quotas d'émissions où la rigueur est mesurée par les prix moyens des permis agrégés au niveau national. Plus le prix est élevé, plus la politique est stricte. Les systèmes d'échange d'énergies renouvelables sont un système d'échange de certificats d'énergie renouvelable basé sur l'obligation de s'approvisionner en électricité à partir de sources vertes. Plus ce pourcentage est élevé, plus la politique est stricte.

Enfin, l'indicateur de subventions à la R&D représente le montant dépensé par le gouvernement dans ce domaine sur les technologies énergétiques à faible intensité de carbone divisé par le PIB nominal. La valeur est multipliée par 1000 pour une meilleure lisibilité.

### III. Statistiques descriptives

Dans cette section, nous allons nous focaliser sur les statistiques descriptives des différentes variables pertinentes à l'étude des politiques industrielles visant la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. L'objectif est de déterminer les tendances centrales et les dispersions des variables telles que les émissions de CO<sub>2</sub>, les investissements en matière de technologie verte, et les innovations, pour comprendre leur évolution et leur impact potentiel. Cette analyse nous servira de fondation pour une évaluation des mesures politiques, en offrant une vue d'ensemble claire et quantifiable des données collectées, et en préparant le terrain pour des analyses plus complexes dans les sections suivantes du mémoire.

Figure 3 : Boxplot des différentes variables



La figure ci-dessus représente un *boxplot* (ou boîte à moustache) et offre une visualisation comparative des distributions des diverses variables étudiées. Chaque boîte à moustaches représente une variable différente, fournissant des informations sur la médiane, les quartiles et les valeurs extrêmes, ce qui permet d'apprécier rapidement la variabilité et la centralité des données :

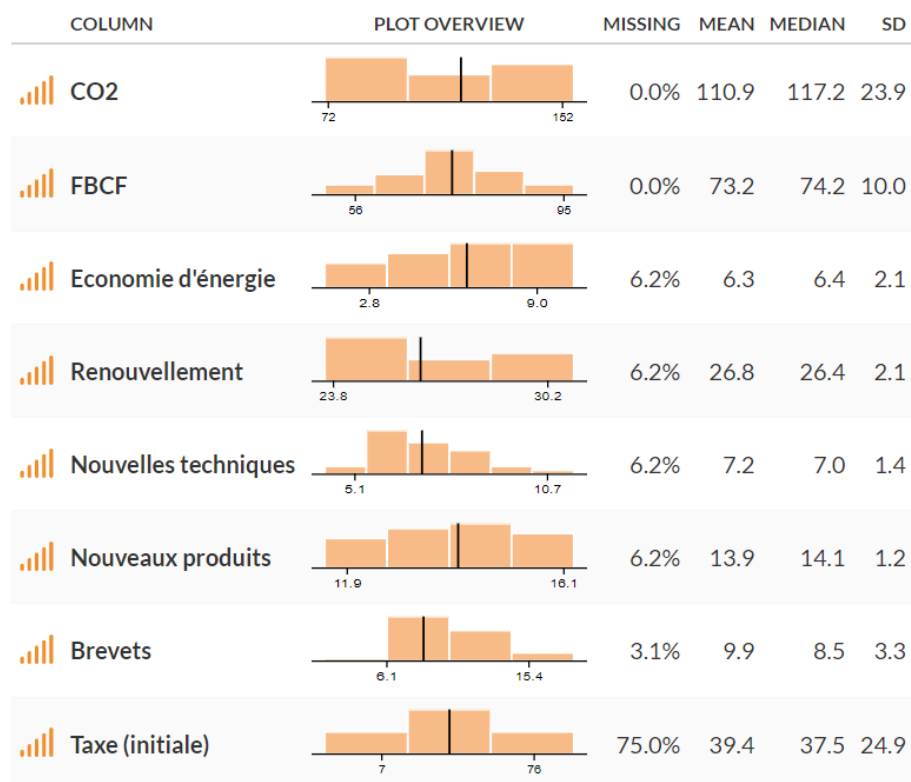
- **Brevets (Rouge)** : La boîte est relativement étroite, indiquant une faible variabilité dans le nombre de brevets déposés. La médiane basse suggère que la majorité des observations se situe à des niveaux inférieurs, ce qui peut indiquer une innovation modeste ou des variations dans l'encouragement des innovations brevetées dans ce secteur malgré une augmentation du nombre de dépôts ces dernières années.
- **CO<sub>2</sub> (Bleu)** : La médiane tend légèrement vers le troisième quartile indiquant une asymétrie avec une concentration des données dans ce quartile supérieur. Cela suggère que les émissions plus élevées sont plus fréquentes au cours de la période 1990-2021. Les moustaches s'étendent des deux côtés, indiquant la présence de quelques valeurs extrêmement basses et élevées, mais avec une prédominance de valeurs plus élevées dans l'ensemble.
- **Economie d'énergie (Vert)** : La distribution est assez compacte, avec une médiane bien centrée dans la boîte. Cette configuration indique une variabilité relativement faible parmi les données, avec la majorité des valeurs regroupées autour de la médiane. Les extrémités des moustaches ne s'étendent pas très loin, ce qui suggère qu'il y a peu de valeurs extrêmes ou d'outliers dans les données.
- **FBCF (Violet)** : La médiane est centrée avec une amplitude modérée, indiquant une variabilité modeste des investissements en capital fixe. Les moustaches, qui ne

s'étendent pas très loin, suggèrent peu de valeurs extrêmes, reflétant une certaine uniformité dans les investissements.

- **Nouveaux produits (orange), Nouvelles techniques (jaune), Renouvellement (marron)** : Pour ces trois types d'investissements, la distribution est globalement similaire et étroite avec des médianes plus ou moins centrées. La variabilité de ces investissements dans le secteur manufacturier est donc plutôt faible.
- **Taxe initiale (Rose)** : la médiane est légèrement décalée vers le premier quartile, ce qui indique une distribution où la majorité des valeurs de la taxe se concentrent dans la moitié inférieure de la distribution. Cependant, la médiane reste relativement centrée, montrant une distribution assez équilibrée des valeurs de la taxe à travers le spectre 2014-2021. Les moustaches, qui s'étendent surtout vers le haut, indiquent la présence de valeurs extrêmes élevées.

Après avoir examiné la distribution des différentes variables à travers les boxplots, nous allons maintenant approfondir notre analyse en étudiant les statistiques descriptives détaillées fournies pour chaque variable.

*Figure 4 : Distribution des variables*



Cette figure présente un aperçu exhaustif des principales mesures statistiques pour chaque variable clé dans notre étude. Ces données incluent la moyenne, la médiane, l'écart-type et le pourcentage de données manquantes, fournissant un cadre détaillé pour comprendre la distribution et la centralité des variables étudiées :

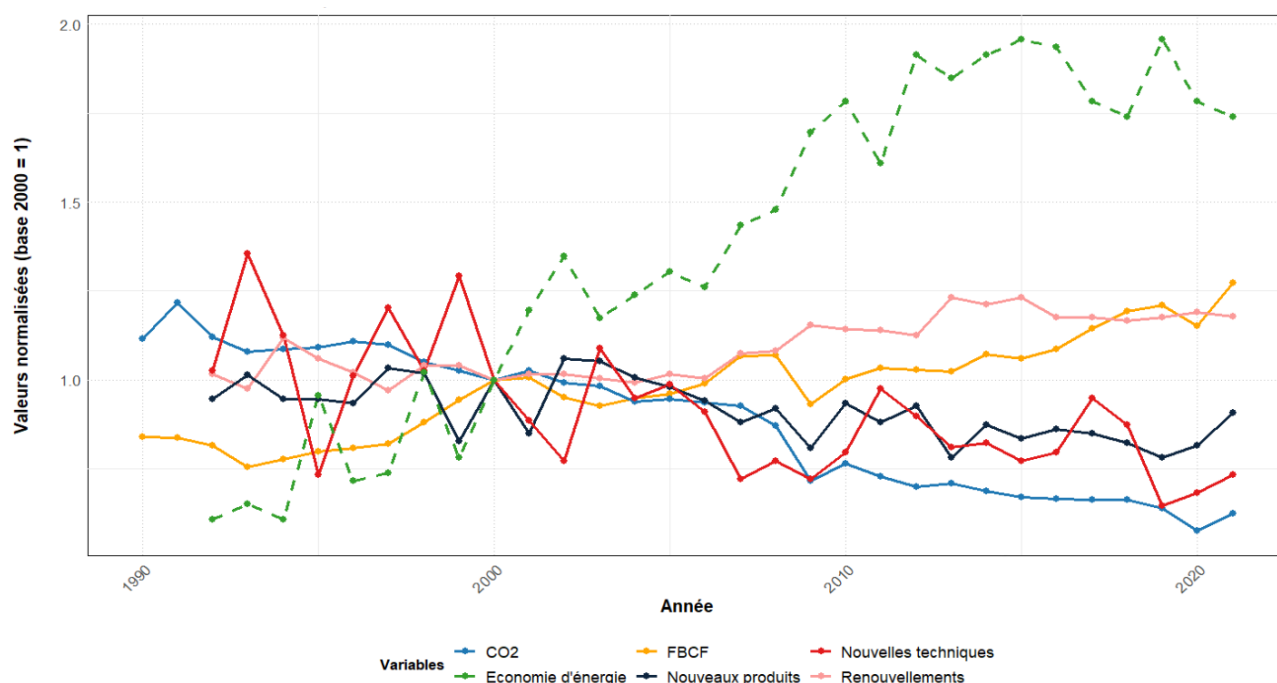
- **CO<sub>2</sub>** : Avec une moyenne de 110.9 et une médiane de 117.2, les émissions de CO<sub>2</sub> présentent une asymétrie légère, indiquée par une médiane supérieure à la moyenne. L'écart-type de 23.9 souligne une variabilité notable, suggérant des différences

significatives dans les émissions sur la période. L'absence de données manquantes (0%) confirme la complétude de cette variable pour les analyses.

- **Économie d'énergie** : Avec un faible écart-type de 2.1 et une médiane quasi équivalente à la moyenne (6.4 vs 6.3), cette variable montre une distribution très serrée, ce qui peut indiquer une adoption cohérente des pratiques d'économie d'énergie.
- **FBCF** : La Formation Brute de Capital Fixe montre une moyenne de 73.2 avec une médiane très proche de 74.2, indiquant une distribution relativement symétrique. L'écart-type de 10.0 suggère une dispersion modérée, reflétant une certaine uniformité dans les investissements.
- **Renouvellement, Nouvelles techniques, et Nouveaux produits** : Ces trois variables montrent des écarts-types relativement faibles (2.1, 1.4, 1.2 respectivement) et des médianes très proches de leurs moyennes, indiquant des distributions symétriques et peu de valeurs extrêmes, ce qui reflète une stabilité dans le renouvellement et l'adoption de nouvelles technologies et produits.
- **Brevets** : Avec un écart-type de 3.3, les données montrent une variabilité plus grande comparée aux nouvelles pratiques et produits, mais une faible proportion de données manquantes (3.1%) suggère une bonne intégrité des données recueillies.
- **Taxe initiale** : La médiane à 37.5 contre une moyenne de 39.4 avec un écart-type de 24.9 montre la plus grande variabilité parmi toutes les variables. Il est cependant à noter que les 75% de données manquantes ne sont pas préoccupantes, car la taxe a été instaurée en 2014, d'où les données manquantes sur la période de 1990-2013.

Pour conclure cette troisième partie sur les statistiques descriptives, intéressons-nous à l'évolution temporelle des émissions de CO<sub>2</sub>, des investissements en capital fixe (FBCF), et des divers investissements dans le secteur industriel entre 1990 et 2021. Cette analyse permettra de visualiser les tendances à long terme et d'identifier les corrélations potentielles entre les pratiques d'investissement et les niveaux d'émission.

*Figure 5 : Évolution du CO<sub>2</sub>, de la FBCF et des investissements verts dans le secteur industriel entre 1990 et 2021*





La normalisation des données en 2000 permet de créer une base de référence commune, afin d'aligner les tendances et de faciliter la comparaison des évolutions pour les différentes variables, permettant une meilleure compréhension de l'aperçu des relations entre les émissions de CO<sub>2</sub> et les investissements dans le secteur manufacturier au fil du temps.

Nous observons une tendance générale à la baisse des émissions de CO<sub>2</sub>, d'apparence linéaire. Cette tendance à la baisse pourrait refléter l'efficacité croissante des technologies de réduction des émissions et l'impact des politiques environnementales, comme nous le verrons dans notre modèle économétrique. La FBCF montre une augmentation progressive au fil du temps, avec des fluctuations notables. Cette tendance ascendante indique un renouvellement constant et une modernisation des équipements et infrastructures, ce qui pourrait être lié à des investissements en technologie plus propres et plus efficaces.

Quant aux investissements en économie d'énergie, nous constatons une croissance claire dans ces derniers, surtout depuis les années 2000. Cette tendance pourrait suggérer une prise de conscience accrue de la nécessité d'optimiser l'utilisation de l'énergie dans les processus industriels et intuitivement cela nous amène à penser que les économies d'énergie jouent un rôle capital dans la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.

Concernant les investissements en nouveaux produits et techniques, les courbes montrent des tendances variables, avec des périodes d'augmentation suivies de stabilisation ou de légère baisse, indiquant des cycles, plus apparent pour les investissements en nouvelles techniques. Cependant, la part de ces deux investissements ont baissé entre 1992 (**8.1%** et **14.4%**) et 2021 (**5.8%** et **13.8%**). Enfin, pour les investissements en renouvellements, nous discernons une légère augmentation sur la période avec quelques fluctuations au cours du temps.

L'examen des distributions, des tendances temporelles, et des statistiques descriptives des données montre clairement des dynamiques variées au sein des variables étudiées, soulignant les impacts des politiques environnementales et des innovations industrielles sur les émissions de CO<sub>2</sub>. Cette analyse préliminaire révèle des informations cruciales sur les relations potentielles entre les investissements verts et les performances environnementales du secteur manufacturier.

Avec ces premières idées sur les données, nous abordons maintenant la spécification du modèle économétrique, une étape essentielle pour quantifier l'efficacité des politiques et des investissements examinés en vue d'établir des relations causales précises entre les variables clés.

## IV. Spécification du modèle économétrique

Pour donner suite à l'analyse des tendances des émissions de CO<sub>2</sub> et des divers investissements dans le secteur manufacturier, il est essentiel d'approfondir notre compréhension des facteurs influençant ces émissions. Commençons par détailler notre modèle économétrique comportant quatre équations. La première équation vise à quantifier les impacts spécifiques des trois politiques précisés dans l'introduction (marchandes, non-marchandes et de soutien technologique) sur les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur manufacturier.

L'équation proposée est la suivante :

$$CO2_{manufacturier} = \beta_0 + \beta_1 PM + \beta_2 PNM + \beta_3 subventions + \varepsilon$$

où *PM* représente les politiques marchandes, *PNM* les politiques non marchandes et *Subventions* représentent les aides financières allouées pour la recherche et développement encourageant des pratiques respectueuses de l'environnement. Ce modèle permettra de déterminer si ces facteurs contribuent significativement à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et dans quelle mesure ils le font.

Cette démarche s'aligne directement avec notre question de recherche : Quelles sont les politiques à privilégier pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur manufacturier français ? En identifiant et en quantifiant les effets de ces variables clés, nous pourrions fournir des recommandations précises sur les politiques les plus efficaces pour atteindre les objectifs de réduction d'émissions dans ce secteur.

Pour donner suite à notre première équation, nous affinons notre analyse en introduisant une seconde équation axée sur des instruments précis pour chaque type de politique environnementale. Ce modèle explore l'impact direct de mesures spécifiques sur les émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur manufacturier :

$$CO2_{manufacturier} = \beta_0 + \beta_1 Brevets + \beta_2 \log(1 + Taxe_{Initiale}) + \beta_3 TMSD + \varepsilon$$

Ce modèle nous permet d'évaluer l'efficacité de variables telles que les brevets verts dans le secteur manufacturier, la taxe carbone et les normes sur la teneur maximale du soufre dans le diesel, offrant ainsi des aperçus précis sur les mécanismes de réduction des émissions. Cette approche ciblée aide à identifier les leviers les plus efficaces pour influencer les pratiques industrielles vers la durabilité.

La forme fonctionnelle de cette équation est justifiée par les deux graphiques ci-dessous.

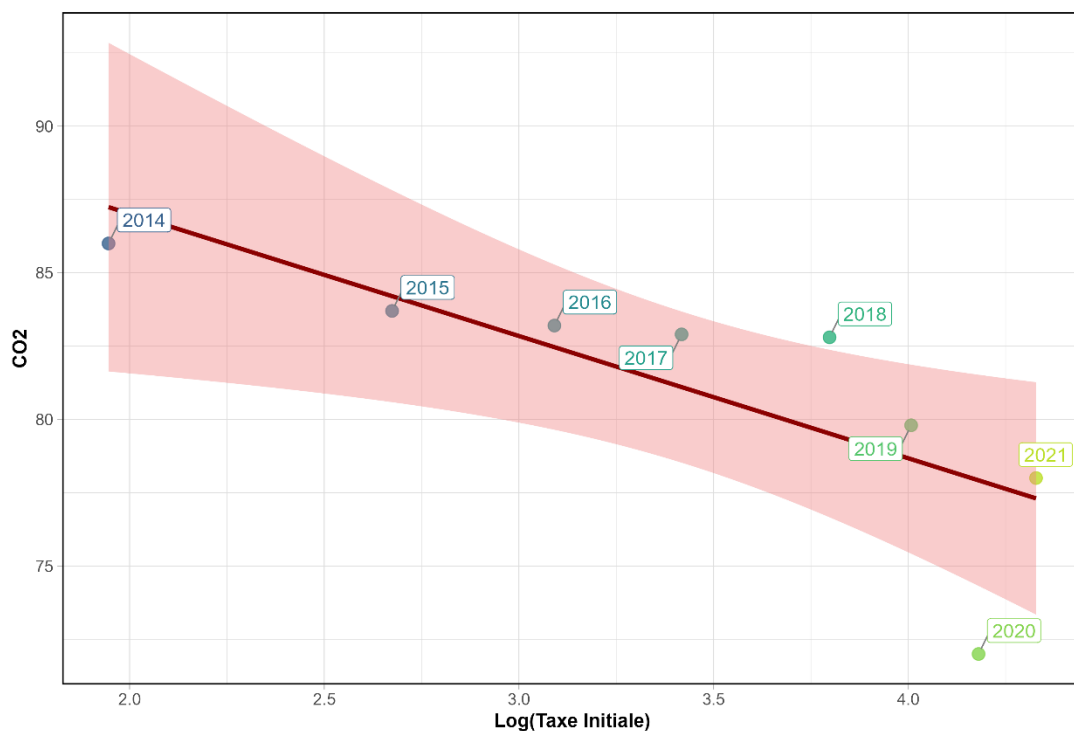
Figure 6 : Relation entre les brevets verts et le CO<sub>2</sub>



La figure 6 montre une tendance linéaire et décroissante claire des émissions de CO<sub>2</sub>, illustrée par la ligne de régression et sa bande de confiance rouge. Lorsque le pourcentage de brevets verts augmente, les émissions de CO<sub>2</sub> diminuent. Cette relation linéaire négative justifie l'usage d'une forme fonctionnelle linéaire dans notre modèle économétrique, qui utilise les brevets verts pour prédire les émissions de dioxyde de carbone, capturant ainsi efficacement la tendance observée.

Le graphique suivant (figure 7) montre une relation décroissante entre le logarithme de la taxe initiale et les émissions de CO<sub>2</sub>, confirmant que l'utilisation du logarithme permet d'analyser plus précisément les effets non linéaires des augmentations de taxe sur les réductions de CO<sub>2</sub>. Nous avons testé la forme linéaire, la forme polynomiale ainsi que la forme logarithmique et c'est bien cette dernière qui nous procurait les meilleurs résultats.

*Figure 7 : Relation entre le logarithme de la taxe initiale et le CO<sub>2</sub>*



À la suite des analyses précédentes qui ont mis en lumière les effets des politiques environnementales sur les émissions de CO<sub>2</sub>, nous approfondissons maintenant notre étude en examinant spécifiquement comment les différents types d'investissements influencent ces émissions dans le secteur manufacturier. La troisième équation a été élaborée pour explorer cette dynamique :

$$CO2_{manufacturier} = \beta_0 + \beta_1 EE + \beta_2 R + \beta_3 NT + \beta_4 NP + \beta_5 FBCF + \epsilon$$

Ce modèle vise à déterminer quel type d'investissement est le plus efficace pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, contribuant ainsi à une meilleure compréhension de la manière dont les initiatives financières peuvent être optimisées pour soutenir la durabilité environnementale dans le secteur manufacturier.

Enfin, après la formulation dans la partie précédente du potentiel impact des investissements en économie d'énergie sur la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> (figure 5), nous explorons désormais

les politiques qui encouragent ces investissements bénéfiques. Notre motivation à étudier cette relation trouve son origine dans l'étude menée par Eric Orhn, *The Effect of Corporate Taxation on Investment and Financial Policy: Evidence from the DPAD*, publié dans *American Economic Journal : Economic Policy*, montrant l'impact causal des politiques, en particulier marchandes, sur les décisions d'investissements. Le modèle suivant est examiné pour cette fin :

$$EE_{manufacturier} = \beta_0 + \beta_1 PM + \beta_2 PNM + \beta_3 subventions + \epsilon$$

Cette dernière équation vise à évaluer l'influence des trois politiques définies plutôt sur les investissements en économie d'énergie. L'analyse de ces variables permet de déterminer les politiques les plus efficaces pour stimuler les pratiques durables dans le secteur manufacturier.

Pour résumer, nous avons donc développé un modèle comportant quatre équations pour analyser l'impact des politiques et innovations sur les émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur manufacturier. La première équation évalue comment les politiques marchandes, non marchandes et les subventions influencent directement les émissions de CO<sub>2</sub>. La deuxième se focalise sur les effets spécifiques des brevets verts, des taxes environnementales, et des normes sur les carburants. La troisième, en revanche, explore l'influence des divers types d'investissements, sur les émissions de CO<sub>2</sub>, mettant en lumière quels sont les investissements à privilégier pour atteindre la neutralité carbone. Enfin, la dernière approfondit la relation entre les investissements en économie d'énergie et les différentes politiques. Ensemble, ces modèles offrent une vue complète sur les stratégies efficaces pour réduire les émissions tout en favorisant la croissance durable.

Passons maintenant à l'estimation et à l'interprétation des résultats obtenus à partir de ces modèles, ce qui nous permettra de confirmer les hypothèses posées et d'évaluer l'efficacité des différentes politiques étudiées.

## V. Estimation et interprétation des résultats

Dans cette section, nous allons procéder à l'estimation et à l'interprétation des résultats obtenus à partir de nos équations économétriques. Avant de se plonger dans l'analyse des résultats spécifiques, il est essentiel de rappeler l'importance des hypothèses de Gauss-Markov dans le contexte de la régression linéaire multiple. Ces hypothèses sont cruciales pour garantir une analyse causale :

- *Hypothèse 1 : Linéarité en les paramètres :*  
Les quatre équations développées dans notre étude sont formulées de manière à respecter l'hypothèse de linéarité en les paramètres. Cette condition est fondamentale pour l'application de la méthode des moindres carrés ordinaires et est donc vérifiée dans tous nos modèles économétriques.
- *Hypothèse 2 : Echantillonnage aléatoire :*  
Travaillant avec des séries temporelles, les données ne sont pas indépendantes et identiquement distribuées (i.i.d.) dans le temps, en raison des effets tendanciels et de la

saisonnalité qui en découle (Introductory Econometrics: A Modern Approach, Jeffrey Wooldridge).

- *Hypothèse 3 : Non colinéarité parfaite et non constance :*

Dans notre analyse des statistiques descriptives, la variabilité significative des variables explicatives a confirmé la non-constance des données. Pour l'absence de colinéarité parfaite, l'évaluation de nos modèles via le logiciel R a démontré qu'aucune corrélation parfaite n'existe entre les variables ; autrement, R n'aurait pas été capable d'estimer les modèles.

- *Hypothèse 4 : Nullité de l'espérance conditionnelle :*

Nos régressions ne contenant que les types de politiques et les types d'investissements peuvent compromettre la nullité de l'espérance conditionnelle en raison de la présence de variables omises significatives. Des facteurs tels que le nombre d'entreprises dans le secteur manufacturier, le chiffre d'affaires des entreprises de ce secteur, ainsi que des indicateurs macroéconomiques comme le PIB manufacturier ou global, sont très certainement corrélées aux politiques ainsi qu'aux émissions de GES.

Avec la reconnaissance que deux des hypothèses de Gauss-Markov sont violées, nous devons tirer des conclusions avec précaution. Nous pouvons désormais procéder à l'estimation de la première équation pour quantifier l'impact précis des politiques marchandes, non marchandes, et des subventions sur les émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur manufacturier.

*Tableau 1 : Résumé de la régression  $CO_2 = \beta_0 + \beta_1 \text{Marchandes} + \beta_2 \text{Non marchandes} + \beta_3 \text{Subvention} + u$*

	Estimation	Erreur Standard	Statistique T	P-valeur	Limite Inférieure	Limite Supérieure
Intercept	174.6604	4.9878	35.0175	0.0000	164.4263	184.8945
Marchandes	-7.3219	1.4091	-5.1963	0.0000	-10.2130	-4.4307
Non marchandes	-6.3980	1.2942	-4.9437	0.0000	-9.0535	-3.7426
Subvention	-6.5012	1.8756	-3.4662	0.0018	-10.3497	-2.6528

Les limites inférieure et supérieure correspondent aux bornes d'un intervalle de confiance à 95%.  $R^2 = 0.9375$ ,  $R^2$  ajusté = 0.9306, Statistique F = 135.0384, RSE = 6.1857

Cette régression linéaire menée pour évaluer l'impact des politiques marchandes, non marchandes et des subventions sur les émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur manufacturier montre des résultats statistiquement significatifs. L'intercept, estimé à 174.660, indique les émissions des gaz à effet de serre en mégatonnes d'équivalent de dioxyde de carbone attendues en l'absence de mise en œuvre de ces politiques, avec une significativité statistique élevée ( $p < 0.0001$ ).

Le modèle prédit en moyenne également qu'un point supplémentaire sur le score de la rigueur des politiques marchandes réduit les émissions de CO<sub>2</sub> de 7.322 mégatonnes, toutes choses égales par ailleurs. De même, un point supplémentaire sur le score de rigueur des politiques non marchandes réduit les émissions de 6.398 mégatonnes à autres facteurs constants. Enfin, chaque unité d'augmentation du montant des subventions par rapport au PIB nominal est associée à une

diminution moyenne de 6.5 mégatonnes d'émissions de CO<sub>2</sub>, toutes choses égales par ailleurs. Les p-valeur associées à chaque coefficient estimé sont très faibles, indiquant une forte significativité statistique et permettant de rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle chaque politique, prise individuellement, n'aurait aucun effet significatif sur les émissions de gaz à effet de serre.

La robustesse de ces résultats est aussi confirmée par un test de Fisher, permettant de rejeter l'hypothèse nulle que l'ensemble des politiques combinées n'aurait aucun effet sur les émissions. En ce qui concerne la qualité du modèle, le coefficient de détermination multiple (R<sup>2</sup>) de 0.9375 suggère que les variables explicatives incluses dans le modèle expliquent ensemble 93.75% de la variation observée dans les émissions de CO<sub>2</sub>. De plus, l'ajustement du R<sup>2</sup> de 0.9306 montre que ce modèle tient compte de la taille de l'échantillon et évite le surajustement.

Après avoir analysé l'influence des politiques marchandes, non marchandes et des subventions sur les émissions de CO<sub>2</sub>, nous approfondissons notre étude en intégrant des variables spécifiques qui reflètent des interventions technologiques et réglementaires plus directes. Le prochain modèle inclut les brevets verts, un terme logarithmique pour la taxe initiale, et les normes maximales de soufre dans le diesel (TMSD), pour évaluer leur impact direct sur les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur manufacturier. Cette approche nous permettra de déterminer l'efficacité des innovations et des réglementations spécifiques dans la réduction des émissions polluantes.

*Tableau 2 : Résumé de la régression  $CO_2 = \beta_0 + \beta_1 \text{Brevets} + \beta_2 \log(1 + \text{Taxe initiale}) + \beta_3 \text{TMSD} + u$*

	Estimation	Erreur Standard	Statistique T	P-valeur	Limite Inférieure	Limite Supérieure
Intercept	168.1741	3.0879	54.4628	0.0000	161.8383	174.5099
Brevets	-4.1701	0.4678	-8.9141	0.0000	-5.1300	-3.2103
log(1 + TI)	-3.7737	0.7260	-5.1983	0.0000	-5.2633	-2.2842
Soufre	-2.9264	0.6415	-4.5621	0.0001	-4.2426	-1.6102

Les limites inférieure et supérieure correspondent aux bornes d'un intervalle de confiance à 95%. R<sup>2</sup> = 0.9638, R<sup>2</sup> ajusté = 0.9598, Statistique F = 239.9598, RSE = 4.7050

Cette régression linéaire menée pour évaluer l'impact d'un exemple de politiques marchandes, un exemple de politiques non-marchandes et un impact direct des subventions (brevets) sur les émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur manufacturier montre des résultats statistiquement significatifs. Avec un intercept estimé à 168.174, le modèle suggère qu'en l'absence de ces interventions, les émissions attendues de CO<sub>2</sub> seraient considérablement élevées, confirmé par la très forte significativité statistique de ce terme ( $p < 0.0004$ ).

En détail, le modèle indique que chaque augmentation d'un point de pourcentage dans les brevets verts est associée à une réduction de 4.170 mégatonnes de CO<sub>2</sub>, toutes choses égales par ailleurs, affirmant l'efficacité des innovations vertes. Par ailleurs, à autres facteurs constants, une augmentation de 1% de la taxe initiale réduit les émissions de CO<sub>2</sub> de 0.037 mégatonnes, démontrant l'impact positif des incitations fiscales sur les pratiques environnementales. De plus, une augmentation d'un point supplémentaire sur le score de la rigueur de la norme concernant

la teneur maximale en soufre dans le diesel entraîne une baisse de 2.926 mégatonnes des émissions, soulignant l'importance des régulations strictes sur les carburants.

Chaque variable du modèle possède une p-valeur très faible, confirmant la forte significativité statistique de leurs coefficients et la capacité du modèle à rejeter l'hypothèse nulle de non-effet de ces politiques. Le test de Fisher renforce également cette conclusion, en rejetant l'hypothèse nulle que l'ensemble combiné des interventions n'aurait aucun impact significatif sur les émissions. Enfin, la qualité du modèle est très bonne, avec un  $R^2$  de 0.964, et un  $R^2$  ajusté également très élevé, atteignant 0.959.

Après avoir exploré les impacts directs des politiques environnementales, des incitations fiscales, et des normes sur les émissions de  $CO_2$ , notre analyse se tourne maintenant vers une évaluation plus approfondie des investissements en économie d'énergie, en renouvellement d'équipements, ainsi que dans les nouvelles techniques et produits. Cette troisième régression examine comment ces différents types d'investissements industriels, ainsi que la formation brute de capital fixe (FBCF), influencent les émissions de  $CO_2$  dans le secteur manufacturier. Ce modèle nous permettra de discerner les contributions spécifiques de ces investissements à la réduction des émissions, offrant ainsi une vue complète de l'efficacité des stratégies de développement durable au niveau industriel.

Tableau 3 : Résumé de la régression de l'équation :  $CO_2 = \beta_0 + \beta_1 EE + \beta_2 R + \beta_3 NT + \beta_4 NP + \beta_5 FBCF + u$

	Estimation	Erreur Standard	Statistique T	P-valeur	Limite Inférieure	Limite Supérieure
Intercept	298.5526	43.8622	6.8066	0.0000	208.0255	389.0798
EE	-6.4160	1.2136	-5.2870	0.0000	-8.9207	-3.9114
R	-3.4581	1.0482	-3.2989	0.0030	-5.6215	-1.2946
NT	-2.5883	1.0402	-2.4883	0.0202	-4.7353	-0.4414
NP	0.2364	1.2953	0.1825	0.8567	-2.4370	2.9098
FBCF	-0.5623	0.1863	-3.0177	0.0060	-0.9468	-0.1777

Les limites inférieure et supérieure correspondent aux bornes d'un intervalle de confiance à 95%.  $R^2 = 0.9552$ ,  $R^2$  ajusté = 0.9459, Statistique F = 102.4154, RSE = 5.2908

Sur le même standard que les précédentes, cette régression montre des résultats statistiquement significatifs. L'intercept estimé à 235.597 indique les émissions des gaz à effet de serre en mégatonnes d'équivalent de dioxyde de carbone attendues en l'absence d'investissement, avec une significativité statistique élevée ( $p < 0.0001$ ).

Le modèle prédit en moyenne qu'un point de pourcentage supplémentaire des investissements en économie d'énergie réduit les émissions de  $CO_2$  de 6.416 mégatonnes, toutes choses égales par ailleurs. Un point de pourcentage supplémentaire sur les investissements de renouvellement réduit les émissions de 3.458 mégatonnes à autres facteurs constants. De plus, un point de pourcentage supplémentaire de l'investissement des nouvelles techniques est associé à une diminution moyenne de 2.588 mégatonnes d'émissions de  $CO_2$ , lorsque les autres investissements sont fixes. Par ailleurs, la non-significativité des investissements destinés à



l'introduction de nouveaux produits permet de négliger son coefficient positif. Enfin, l'ensemble de l'investissement du secteur manufacturier, représenté par la FBCF, révèle une diminution de 0.562 mégatonnes de CO<sub>2</sub> pour chaque million d'euros supplémentaires investi.

Les p-valeurs associées aux trois premières variables d'investissement et de la FBCF sont très faibles, indiquant une nouvelle fois une forte significativité statistique et permettant de rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle les investissements, pris individuellement, n'auraient aucun effet significatif sur les émissions des gaz à effet de serre, si ce n'est celui destiné à l'introduction de nouveaux produits.

A nouveau, la F-statistique élevée montre que l'on peut rejeter l'hypothèse nulle que l'ensemble des investissements combinés n'aurait aucun effet sur les émissions. En ce qui concerne la qualité du modèle, le R<sup>2</sup> est de 0.9552 et son ajustement est de 0.9459.

À la suite de notre constatation que les investissements en économie d'énergie réduisent significativement les émissions de CO<sub>2</sub>, nous explorons maintenant quels facteurs encouragent ces investissements. Observant précédemment une augmentation notable de ces investissements depuis 2000 (figure 5), notre dernière analyse se concentre sur l'impact des politiques marchandes, non marchandes et des subventions. Ce dernier modèle vise à identifier les politiques qui stimulent le plus efficacement les investissements en économie d'énergie, permettant ainsi de cibler les actions fiscales et réglementaires pour maximiser la réduction des émissions dans le secteur manufacturier.

*Tableau 4 : Résumé de la régression  $EE_{manufacturier} = \beta_0 + \beta_1 Marchandes + \beta_2 Non\ marchandes + \beta_3 Subvention + u$*

	Estimation	Erreur Standard	Statistique T	P-valeur	Limite Inférieure	Limite Supérieure
Intercept	1.1506	0.6535	1.7607	0.0905	-0.1953	2.4964
Marchandes	0.2524	0.1815	1.3905	0.1766	-0.1215	0.6263
Non marchandes	0.8800	0.1788	4.9228	0.0000	0.5118	1.2481
Subvention	0.3100	0.2530	1.2255	0.2318	-0.2110	0.8310

Les limites inférieure et supérieure correspondent aux bornes d'un intervalle de confiance à 95%. R<sup>2</sup> = 0.8755, R<sup>2</sup> ajusté = 0.8605, Statistique F = 58.5803, RSE = 0.7968

“Jamais deux sans trois”, dit-on. La quatrième régression, quant à elle, admet une plus faible significativité de son intercept. Ce dernier estimé à 1.15 et statistiquement significatif au seuil de 9%, implique, qu'en l'absence d'intervention politiques, le pourcentage d'investissement destiné aux économies d'énergie serait de 1.15%.

Du côté des politiques, seules les politiques non-marchandes sont significatives statistiquement. Un point supplémentaire sur le score de la rigueur des politiques non-marchandes est associée à une hausse de 0.88 points de pourcentage d'investissement dans les économies d'énergies, à autres facteurs constants. Une significativité qui s'explique, à contrario des caractéristiques des autres politiques, par l'obligation légale que les non-marchandes représentent, la certitude à long terme des entreprises quant aux exigences environnementales et l'internalisation des coûts associés à la pollution atmosphérique.



Le modèle dans son ensemble demeure significatif avec un test de Fisher permettant d'attester l'effet conjoint des politiques sur l'investissement en économie d'énergie et un coefficient de détermination évalué à 87% accompagné du  $R^2$  ajusté valant 86%.

Après avoir exploré en détail l'impact des différentes politiques environnementales et investissements sur les émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur manufacturier à travers plusieurs équations économétriques, nous nous dirigeons maintenant vers la conclusion de cette étude. Cette dernière section résumera les principaux résultats de notre analyse, proposera des recommandations basées sur ces découvertes, identifiera les limites de notre étude, et envisagera des extensions possibles pour affiner et renforcer la robustesse de notre analyse.

## VI. Conclusion et limites

Notre étude a mis en évidence l'impact significatif des politiques environnementales et des investissements sur les émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur manufacturier français, mettant particulièrement en lumière l'efficacité des politiques non marchandes. À travers des analyses économétriques rigoureuses, nous avons démontré que les politiques marchandes, non marchandes, les subventions et les différents types d'investissements, notamment en économie d'énergie, jouent un rôle crucial dans la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Alors que le monde fait face à des défis sans précédent et s'efforce de respecter les engagements de l'Accord de Paris, nos résultats démontrent que les politiques non marchandes ne sont pas seulement efficaces pour réduire directement les émissions de CO<sub>2</sub>, mais sont également cruciales pour stimuler les investissements en économie d'énergie. Bien que les politiques marchandes et les subventions aient un impact légèrement supérieur sur la réduction directe des émissions de CO<sub>2</sub>, les politiques non marchandes s'avèrent être les plus stratégiques à moyen et long terme, particulièrement dans un contexte où l'adaptation des entreprises aux normes est essentielle.

Ces résultats nous amènent naturellement à considérer un ensemble de recommandations pour renforcer l'impact des politiques environnementales sur le secteur manufacturier :

1. **Prioriser les politiques non marchandes** : En raison de leur double impact sur la réduction des émissions et l'incitation aux investissements en économie d'énergie, ces politiques devraient être privilégiées, même à court terme. Leur importance est renforcée par le contexte économique actuel marqué par une inflation de 4,3% en 2023, un déficit de 5,5%, et des risques de délocalisation fiscale par des entreprises comme Total, qui compliquent la mise en œuvre de politiques marchandes et l'augmentation des subventions.
2. **Augmenter les investissements en économie d'énergie** : Les résultats indiquent que les investissements en économie d'énergie ont l'impact le plus significatif sur la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Nous recommandons donc l'augmentation des financements et des incitations pour faciliter la transition vers des technologies permettant des économies d'énergie. Cela pourrait inclure des crédits d'impôt, plus attractifs pour les entreprises qui investissent dans des technologies vertes.
3. **Continuer d'inciter les innovations vertes** : Etant donné l'impact significatif des brevets verts sur la réduction des émissions, une combinaison d'instruments, comme l'illustre l'ouvrage intitulé *Quelles politiques pour encourager l'innovation verte ?* de

Philippe Aghion, professeur au Collège de France, tels que la taxe carbone sur le marché, la taxe carbone aux frontières (afin d'éviter les « *Pollution Heaven* ») et une subvention à la R&D verte, reste tout de même recommandée.

Notre analyse, bien que rigoureuse, présente certaines limites. Premièrement, la causalité directe entre les politiques et la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> ne peut être affirmée avec certitude due à la nature observationnelle des données (comme évoqué plutôt, problème de saisonnalité avec les séries temporelles). Des expériences ou des données longitudinales pourraient être nécessaires pour établir une relation causale plus robuste. Deuxièmement, des variables omises pourraient biaiser nos résultats. Bien que des variables clés comme les politiques marchandes, non marchandes, et les subventions aient toujours été incluses, d'autres facteurs tels que les changements technologiques, les influences internationales, ou encore le type d'énergie utilisé pourraient impacter à la fois les émissions de CO<sub>2</sub> et les politiques mises en place. Enfin, notre étude se concentre uniquement sur le secteur manufacturier français et pourrait ne pas être généralisable à d'autres secteurs mais également à d'autres pays.

Des recherches futures pourraient inclure une analyse plus large, englobant d'autres secteurs et régions, ainsi que des modèles économétriques plus désignés pour mieux cerner les dynamiques de causalité (*AutoRégressive Integrated Moving Average*, ARIMA). L'adoption de modèles prédictifs pourrait également offrir des perspectives enrichies sur l'efficacité des politiques au fil du temps. Une dernière extension serait d'étudier les effets d'interaction entre les différentes politiques sur les émissions de gaz à effet de serre.

En somme, notre analyse fournit une base pour des politiques publiques éclairées, visant à concilier croissance économique et impératifs environnementaux dans une période critique pour notre planète.