



Projet Data science:

Transition Énergétique et Véhicules Électriques en France

Réalisé par:

- EL BAF Omar
- CHADLI Imane

Encadré par:

- Anne Laurent
- Gwladys Toulemonde

Application Interactive : <https://omarittohub.github.io/DS-Project-EVs/>
GitHub Fichier Annex : <https://github.com/Omarittohub/DS-Project-EVs>

INDEX Projet Data science:

A. Analyses	3
1. Répartition des Bornes de Recharges	3
2. Revenues Médian par Departments	4
3. Revenus médians et Bornes de Recharge	5
3.1. Observation principale	6
3.2. Implications	6
B. Comprendre cette disparité a travers des modeles de prediction	8
1. Introduction	9
2. Étapes clés du processus	9
2.1 Extraction des données	9
2.2 Transformation et standardisation des données	9
2.3 Modèle de régression linéaire	9
3. Résultat attendu	10
a. Premier graphique : sans Population	12
b. Deuxième graphique : avec Population	12
C. L'objectif des 400.000 bornes	15
1. Analyse des densités locales	19
D. Détails du dispositif Flexitanie	20
1. Implications pour la transition énergétique	21
1.1. Analyse des bénéfices environnementaux	22
1.2. Recommandations basées sur les résultats	22
1.3. Méthodologie	22
1.4. Implications stratégiques	24
2. Résultats Clés	25
3. Recommandations Stratégiques	25
4. Implications Futures	27
E. Conclusion	27
1. Progrès réalisés et écarts persistants	27
2. Efficacité des subventions et incitations fiscales	27
3. Rôle des investissements publics et privés	27
4. Enjeux environnementaux et sociaux	28
5. Vers une transition énergétique équitable et durable	28

Évaluation de l'avancement et de l'efficacité des politiques publiques pour la transition énergétique :

Quels sont les progrès réalisés par le gouvernement dans la mise en œuvre de ces mesures écologiques, et quels facteurs influencent leur succès ou leur échec ?

1. Réalisation des objectifs gouvernementaux :

- Les **politiques publiques actuelles** ambitionnent d'installer **400 000 bornes** de recharge d'ici **2030**, mais les projections révèlent un **écart** significatif entre les objectifs et les réalisations plausibles.
- Une **analyse des tendances** actuelles est nécessaire pour quantifier cet écart et identifier les leviers d'amélioration.

2. Impact des subventions et incitations fiscales :

- Les **dispositifs** en place (primes à l'achat, avantages fiscaux) sont-ils suffisamment **efficaces** pour stimuler une **adoption massive des véhicules électriques** ?
- Une **redistribution des financements** est-elle nécessaire pour mieux cibler les zones sous-équipées ou à faibles revenus ?

3. Optimisation des investissements publics et privés :

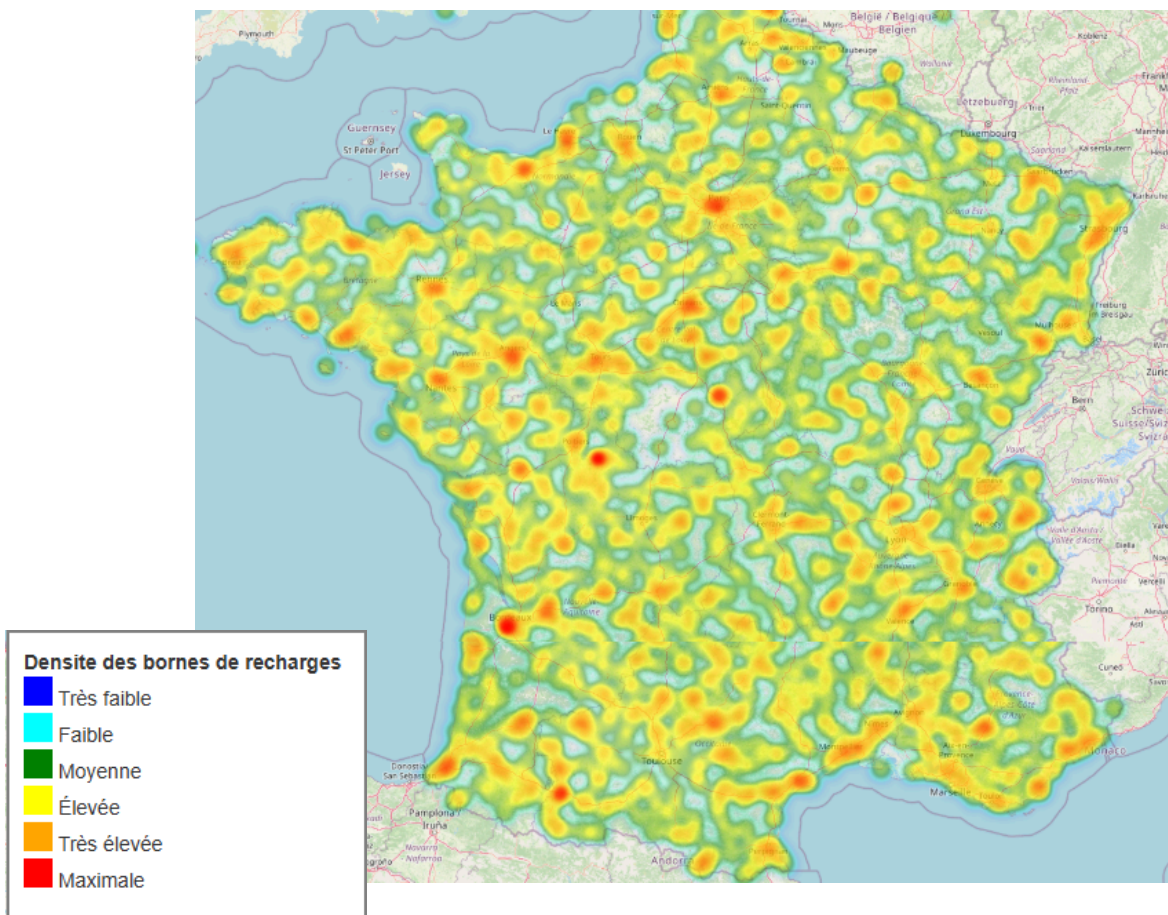
Quelles **priorités géographiques ou socio-économiques** permettent de maximiser l'impact des investissements dans les bornes de recharge ?

L'utilisation de modèles prédictifs peut-elle améliorer la répartition des ressources pour une transition énergétique plus équitable et efficace ?

A. Analyses

1. Répartition des Bornes de Recharges

La première étape consiste à **analyser la répartition des bornes de recharge en France pour identifier les disparités géographiques**. Cette cartographie permettra de repérer les zones bien équipées et celles sous-dotées, en particulier les zones rurales ou à faibles revenus, où le manque d'infrastructures pourrait limiter l'accès aux véhicules électriques.

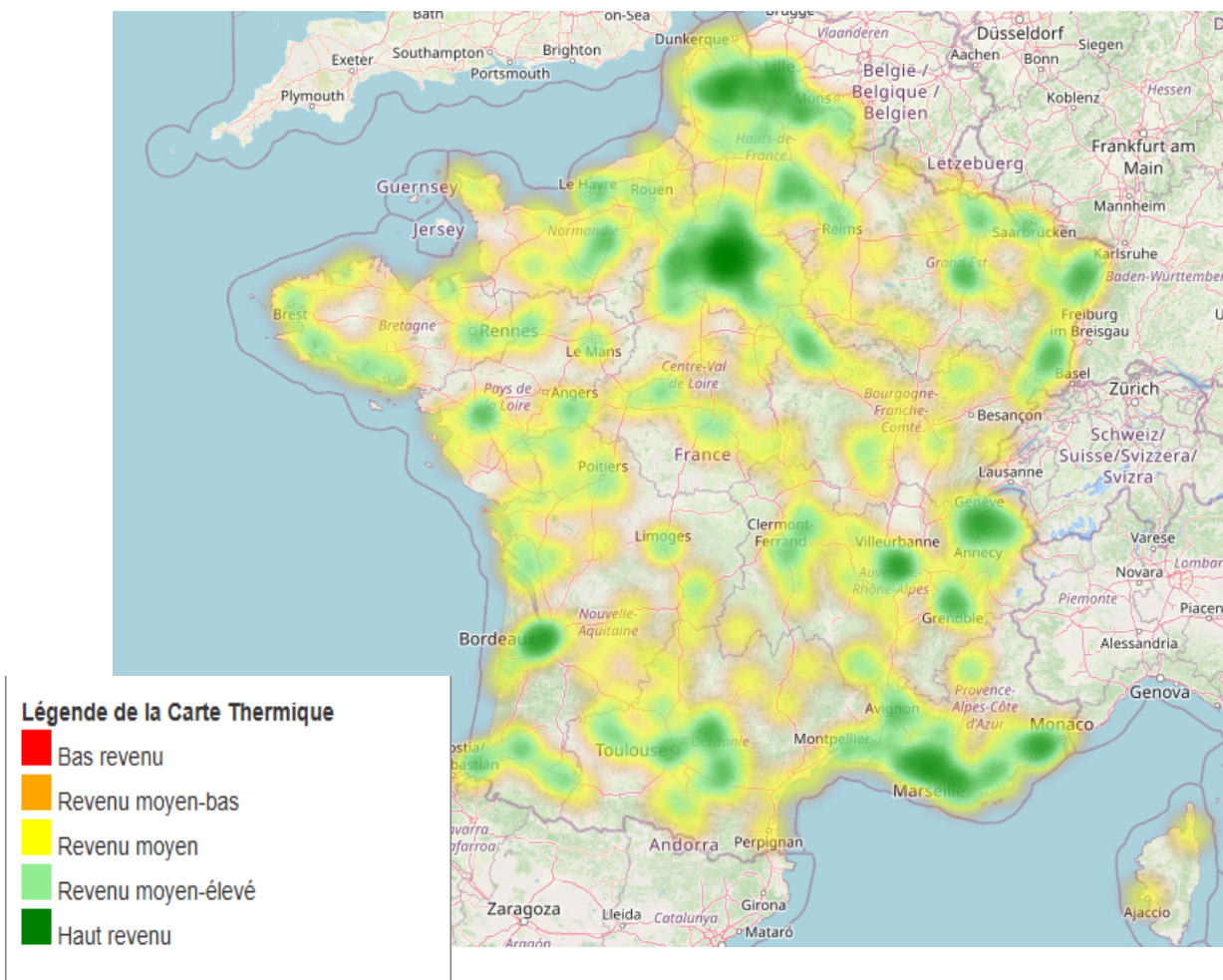


La cartographie révèle une forte disparité dans la densité des bornes de recharge en France. Les zones urbaines, notamment **Paris et Lyon**, ont une densité élevée (rouge et jaune), tandis que les régions rurales et périphériques, surtout au centre et dans le sud, ont une faible densité (bleu). Cela souligne **l'inégalité d'accès aux infrastructures de recharge**, nécessitant des efforts pour équiper les zones sous-dotées et favoriser une transition énergétique équitable.

2. Revenues Médian par Departments :

Nous avons analysé les revenus médians des ménages par ville (données INSEE 2018) pour mieux **comprendre l'impact des disparités économiques sur l'accès aux bornes de recharge**. La carte thermique montre une **corrélation entre les zones à faibles revenus et une faible densité de bornes**, suggérant que les **territoires moins favorisés sont moins équipés pour la transition énergétique**.

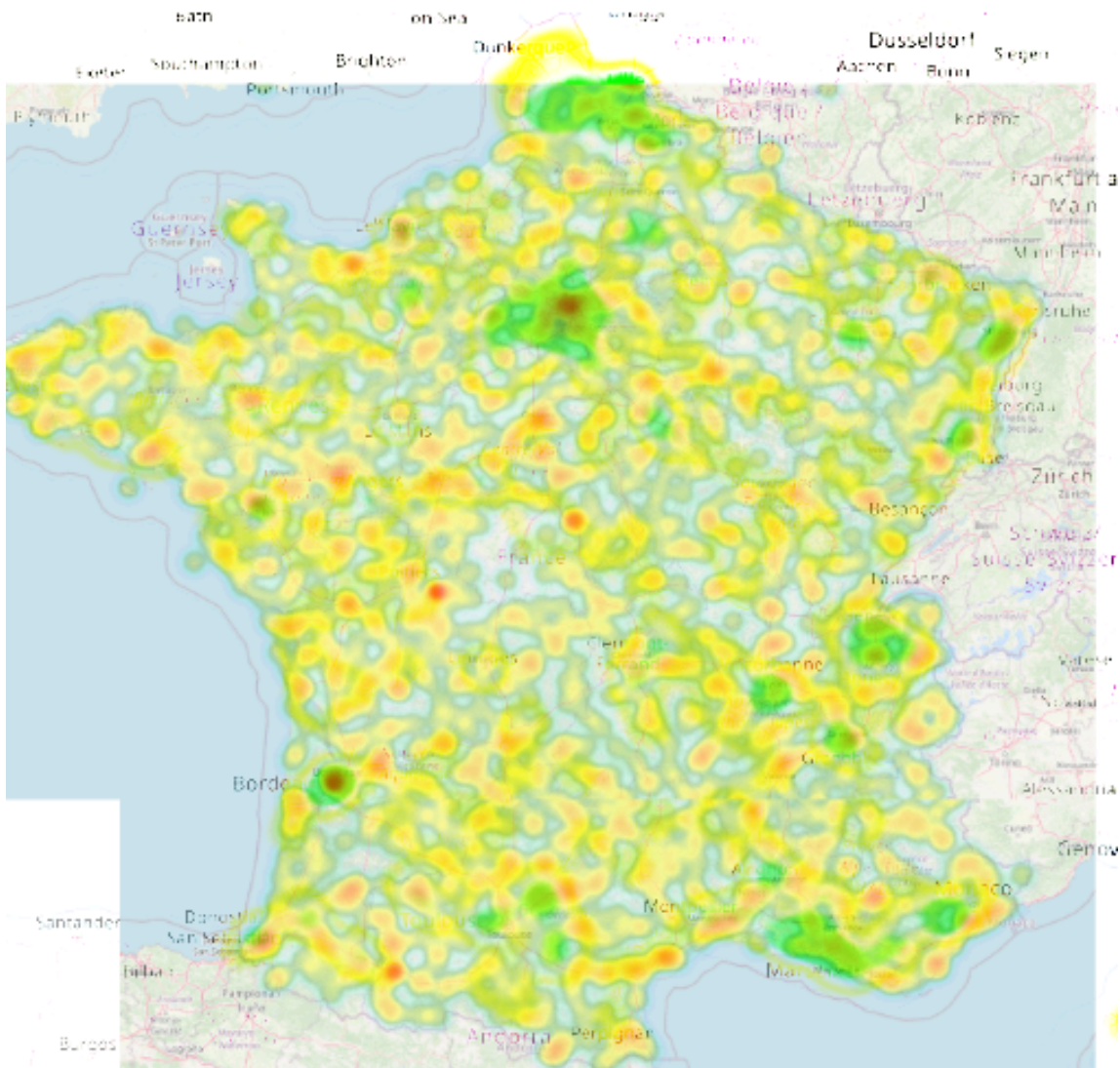
Cette analyse **doit être nuancée** par les réformes fiscales récentes, telles que celles sur les loyers et la taxe d'habitation, qui ont pu influencer les revenus et aggraver les inégalités d'accès aux infrastructures de recharge.



3. Revenus médians et Bornes de Recharge

Pour cette étude, **deux cartes ont été superposées** :

1. Une carte représentant **les niveaux de revenus médians** des ménages par commune (allant du rouge pour les revenus faibles au vert pour les revenus élevés).
2. Une carte montrant **la densité des bornes de recharge pour véhicules électriques (IRVE)**, illustrée par des marqueurs proportionnels à la densité dans chaque zone.



3.1. Observation principale :

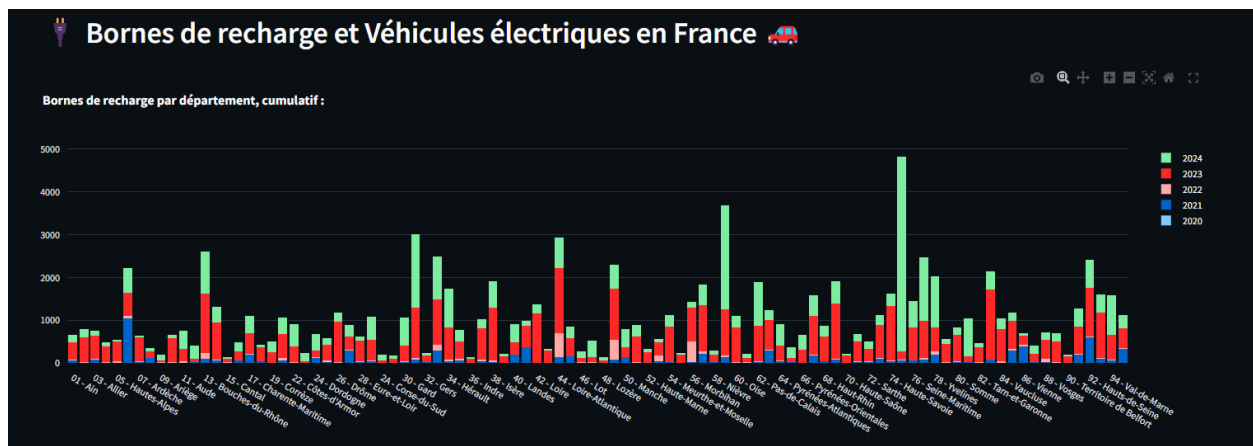
En superposant ces deux cartes, une **forte concentration des bornes de recharge est clairement visible dans les zones où les revenus médians sont élevés** (couleur verte). Cela suggère que les infrastructures IRVE sont davantage présentes dans les communes les plus riches.

3.2. Implications :

Cette corrélation peut s'expliquer par :

- Une adoption plus rapide des véhicules électriques dans les zones à revenus élevés, entraînant une demande accrue d'infrastructures.
- Des investissements publics et privés potentiellement plus concentrés dans ces régions.

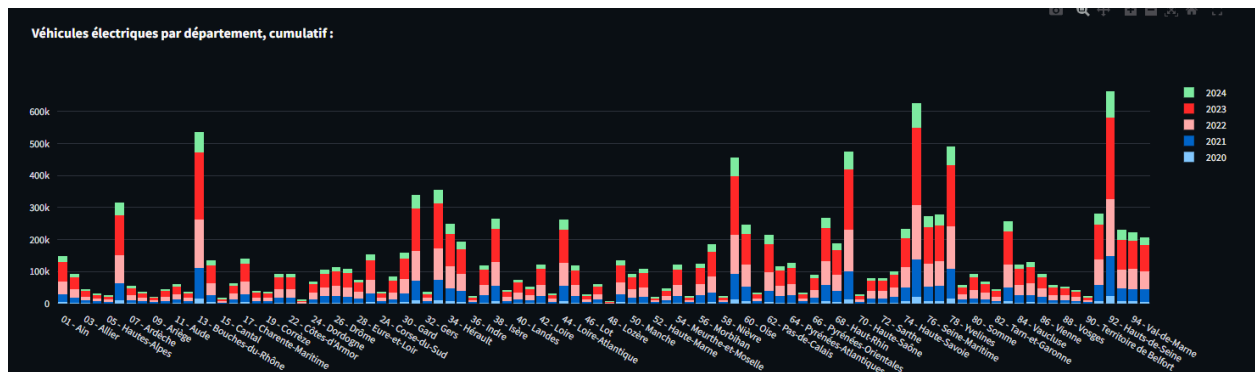
Les zones à faibles revenus (couleur rouge) montrent souvent une faible densité de bornes, ce qui soulève des questions sur l'accessibilité équitable aux infrastructures de recharge pour toute la population.



Le graphique montre l'évolution des bornes de recharge pour véhicules électriques en France de 2020 à 2024

- **Forte croissance à Paris** : Paris (75) a connu une forte augmentation des bornes de recharge en 2024, surpassant largement les autres départements, probablement grâce à des politiques locales favorisant l'adoption des véhicules électriques.

- **Tendances générales par département** : Certains départements, comme Hauts-de-Seine (92) et Val-de-Marne (94), affichent une croissance, mais restent derrière Paris.
- **Structure des données** : Les couleurs représentent les années, avec une accélération visible en 2023 (rouge) et 2024 (vert) dans de nombreux départements.
- **Inégalité régionale** : Les zones urbaines bénéficient davantage d'infrastructures, tandis que certains départements ruraux montrent une faible densité de bornes.



Ce graphique montre le nombre cumulé de véhicules électriques par département en France de 2020 à 2024, mettant en évidence de fortes disparités. Paris, les Hauts-de-Seine, le Rhône et les Bouches-du-Rhône se distinguent par une adoption rapide, grâce à des infrastructures denses et des politiques favorables.

La réglementation européenne AFIR de 2023 impose des règles pour uniformiser le déploiement des bornes de recharge, comme l'installation de stations tous les 60 km et le paiement sans contact. Ces mesures expliquent l'accélération dans les zones urbaines, mais les départements ruraux restent à la traîne. L'AFIR doit être appliquée de manière équilibrée pour garantir une transition équitable, et l'affichage transparent des prix pourrait encourager plus de consommateurs.

Les données montrent une forte disparité dans l'adoption des véhicules électriques entre villes et campagnes. Les grandes villes bénéficient d'infrastructures et d'incitations financières, tandis que les zones rurales sont mal équipées et moins adaptées aux besoins locaux. Il est essentiel de renforcer les infrastructures rurales et d'adapter les véhicules aux spécificités locales.

B. Comprendre cette disparité à travers des modèles de prédiction

Pour analyser les disparités dans l'adoption des véhicules électriques en France, une régression linéaire a été utilisée. Cette méthode quantifie l'influence des facteurs socio-économiques et infrastructurels sur le nombre de véhicules électriques par département, apportant une meilleure compréhension de la transition énergétique.

Analyse des Facteurs Influent sur l'Adoption des Véhicules Électriques en France : Rapport de Data Science

1. Introduction

L'objectif de cette analyse est d'évaluer les facteurs influençant l'adoption des véhicules électriques (VE) en France, en tenant compte des disparités géographiques et socio-économiques. Cette étude se concentre sur la corrélation entre les infrastructures de recharge, les revenus médians, la population et l'adoption des véhicules électriques par département.

2. Étapes clés du processus

2.1 Extraction des données

Les données suivantes ont été collectées pour une analyse complète :

- **Population** : Données de population (1999-2024) par département, utilisées pour estimer la demande potentielle en véhicules électriques.
- **Revenus médians** : Données de revenus par département, permettant d'étudier l'impact du niveau économique sur l'adoption des VE.
- **Points de recharge** : Nombre de bornes de recharge pour 100 000 habitants, afin d'évaluer l'infrastructure de recharge relative à l'adoption des VE.
- **Voitures électriques** : Données sur le nombre de véhicules électriques rechargeables par commune, agrégées par département.

2.2 Transformation et standardisation des données

- **Normalisation des variables** : Agrégation des données de population et de revenus au niveau départemental pour assurer la cohérence des jeux de données.

Harmonisation des noms de communes et départements pour éviter les incohérences lors des croisements.

- **Regroupement** : Agrégation des données de véhicules électriques et de revenus médians par département, créant ainsi des indicateurs agrégés.
- **Fusion des jeux de données** : Création d'une table finale en combinant les données sur la population, les revenus, les points de recharge et les véhicules électriques.

2.3 Modèle de régression linéaire

Un modèle de régression linéaire a été utilisé pour comprendre l'impact des facteurs suivants sur l'adoption des véhicules électriques :

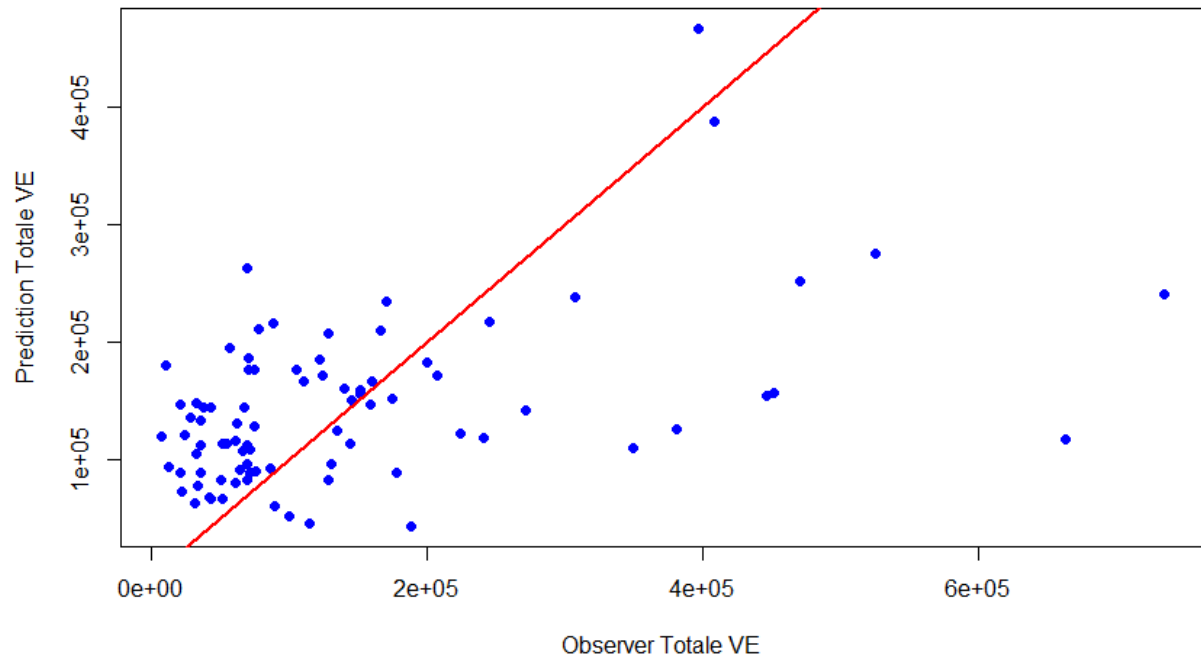
- **Population totale** : Représente le potentiel de demande pour les VE.
- **Revenu médian** : Indicateur économique de la capacité des ménages à adopter des véhicules électriques.
- **Points de recharge** : Indicateur clé de l'infrastructure nécessaire pour soutenir l'adoption des VE.

L'objectif est de déterminer comment ces variables influencent le nombre total de véhicules électriques rechargeables par département.

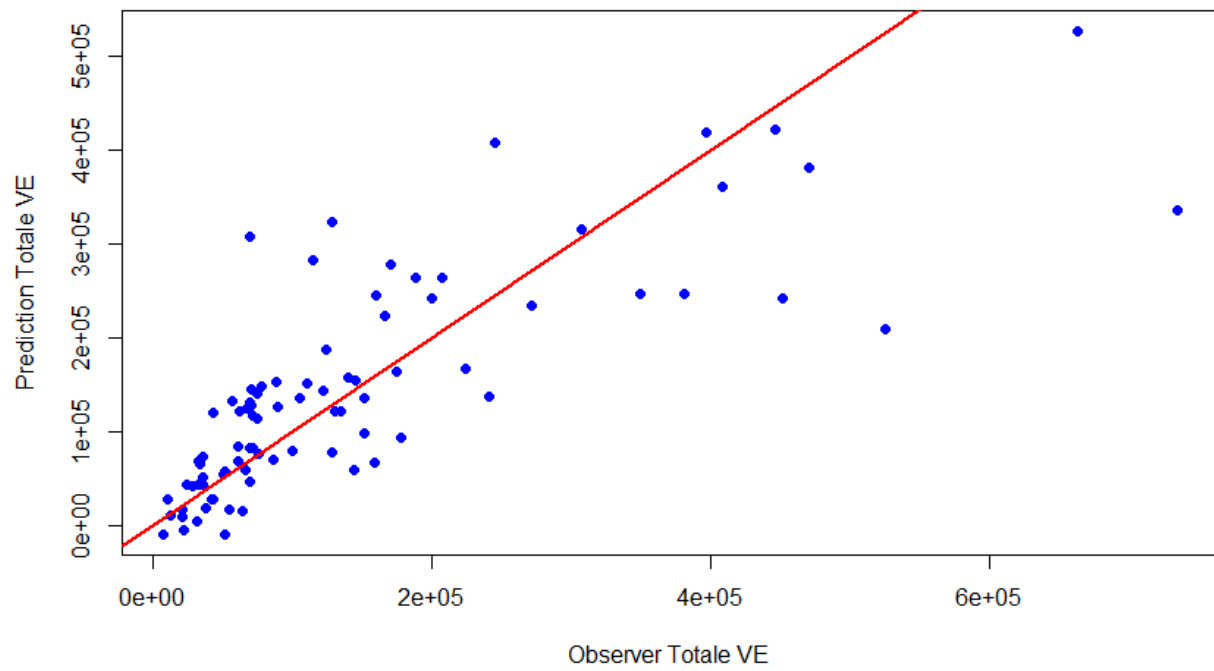
3. Résultat attendu

L'objectif est d'obtenir une meilleure compréhension des inégalités territoriales dans l'adoption des véhicules électriques, en lien avec les infrastructures et les facteurs socio-économiques. Sur cette base, des recommandations seront formulées pour un déploiement plus équitable des ressources publiques, en ciblant les territoires les plus sous-équipés ou défavorisés.

Obsr vs Prediction : sans Population



Obsr vs Prediction : Avec Population



Les graphiques montrent visuellement la différence d'ajustement des modèles **avec** et **sans** la variable **Population Totale** pour prédire le **nombre de VEs** :

1. Premier graphique : sans Population

- Le nuage de points (bleu) est **plus dispersé** autour de la ligne de régression (rouge).
 - Il y a beaucoup de points éloignés de la ligne, ce qui montre que le modèle **ne parvient pas à expliquer correctement** les variations observées.
 - Cela reflète aussi le **R² faible (0.223)** : le modèle n'explique que 22.3% de la variabilité des données.
-

2. Deuxième graphique : avec Population

- Le nuage de points est **plus resserré** autour de la ligne de régression.
 - Les prédictions sont **plus proches des valeurs observées**, surtout dans la partie où les valeurs sont plus faibles.
 - La **dispersion est réduite**, indiquant un ajustement plus précis.
 - Cela concorde avec le **R² beaucoup plus élevé (0.6288)** : le modèle explique 62.88% de la variabilité des données.
-

Conclusion visuelle :

- Ajouter **PopulationTotale** améliore significativement le modèle.
- Le modèle devient plus prédictif (réduction des résidus) et explique mieux les variations des valeurs observées. Cela se traduit par une meilleure **alignement des points autour de la ligne rouge**.

1. P-Values des Variables

Variable	P-Value avec PopulationTotale	P-Value sans PopulationTotale	Commentaire
Intercept	0.0203 *	0.00117 **	Devient plus significatif dans le modèle sans PopulationTotale.
DEC_MED18	0.1140 (non significatif)	6.75e-06 ***	Devient très significatif dans le modèle sans PopulationTotale, car la variance est redistribuée.
NbrDePtsDeRech	0.0532 .	0.37815 (non significatif)	Perte de significativité après l'exclusion de PopulationTotale.
PopulationTotale	1.83e-14 ***	Non incluse	Variable clé, fortement significative dans le premier modèle.

2. R² et R² Ajusté

Critère	Avec PopulationTotale	Sans PopulationTotale	Commentaire
R ²	0.6288 (62.88 %)	0.2234 (22.34 %)	Grande chute, montrant que PopulationTotale explique une part importante de la variance.
R ² Ajusté	0.6148 (61.48 %)	0.2042 (20.42 %)	Confirme la perte de qualité d'ajustement en excluant PopulationTotale.

3. F-Statistic

Critère	Avec PopulationTotale	Sans PopulationTotale	Commentaire
F-Statistic	45.17	11.65	Réduction significative, montrant une perte globale de la significativité du modèle.
P-Value du F	< 2.2e-16	3.58e-05	Moins significatif sans PopulationTotale, mais reste significatif globalement.

Le tableau met en évidence une perte globale de significativité du modèle lorsqu'on exclut la variable **PopulationTotale**, ce qui fait sens puisqu'un nombre élevé de voitures est naturellement lié à une population importante. Voici les principaux points :

1. Perte de significativité sans PopulationTotale :

- La variable **PopulationTotale**, très significative ($p\text{-value} = 1.83e-14$), explique une grande part de la variance. Sans elle, le R^2 chute de 62.88 % à 22.34 %, et le F-Statistic passe de 45.17 à 11.65, montrant une forte dégradation du modèle.

2. Redistribution de l'influence sur DEC_MED18 (revenu median) :

- Sans **PopulationTotale**, **DEC_MED18** devient la variable la plus significative ($p\text{-value} = 6.75e-06$). Cela s'explique par la redistribution de l'effet de **PopulationTotale**, puisque des facteurs comme le salaire moyen par département influencent indirectement le nombre de voitures via le pouvoir d'achat.

3. Conclusion :

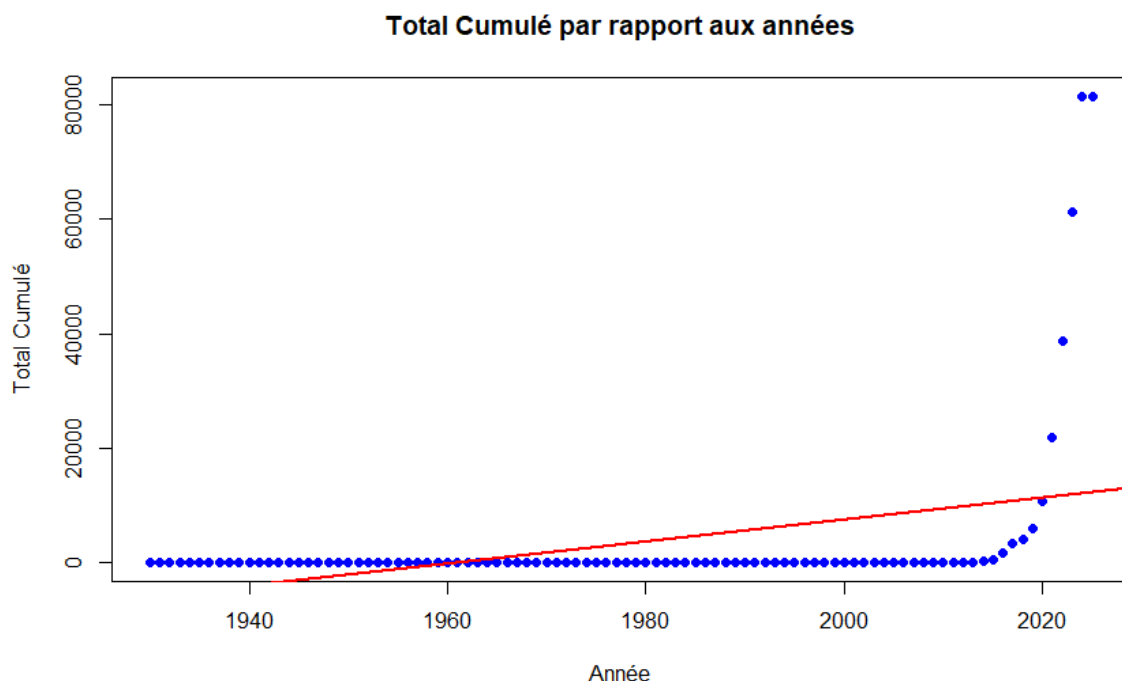
- **PopulationTotale** est essentielle au modèle car elle reflète directement le nombre de véhicules. Sans elle, le modèle perd en précision, mais **DEC_MED18** prend le relais comme indicateur clé. Cette dynamique reflète bien les liens entre population, pouvoir d'achat, et nombre de voitures.

C. L'objectif des 400.000 bornes

En 2010, la France a lancé plusieurs initiatives pour promouvoir les véhicules électriques :

- **Plan "Voiture Électrique"** : Budget de 1,5 milliard d'euros pour soutenir le développement des VE, incluant la recherche sur les batteries et les infrastructures de recharge.
- **Subventions et incitations fiscales** : Prime de 5 000 euros pour l'achat de VE, avec bonus écologique et exonérations fiscales.
- **Infrastructures de recharge** : Objectif de 100 000 bornes fin 2023 et 400 000 d'ici 2030, en partenariat avec des entreprises publiques et privées.

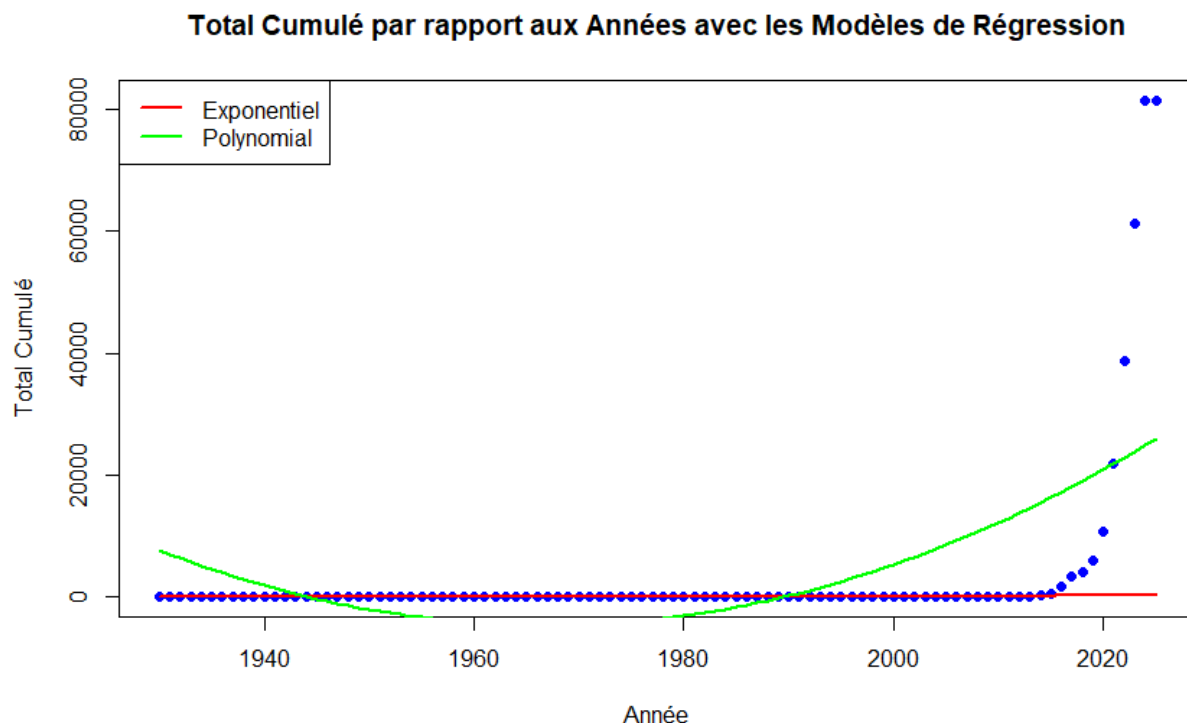
Nous avons choisi de vérifier si la France atteint ses objectifs de 400 000 bornes de recharge d'ici 2030 en utilisant des prévisions basées sur des modèles de régression. Nous avons débuté par un modèle de régression linéaire simple, prenant en entrée l'évolution du nombre de bornes installées chaque année sur une période de 94 ans, depuis les premières bornes enregistrées dans les années 1930 jusqu'à 2024.



Cependant, en analysant les résultats, nous constatons que ce modèle n'est pas approprié. Le R-carré est de 0,15 et le R-carré ajusté de 0,14. Ce sont des valeurs très faibles, ce qui n'est pas un bon signe et indique que le modèle linéaire n'est pas adapté à cette situation.

```
Residual standard error: 12810 on 94 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.1504,    Adjusted R-squared:  0.1413
F-statistic: 16.64 on 1 and 94 DF,  p-value: 9.478e-05
```

Nous avons décidé de changer de modèle, car le modèle linéaire ne reflète pas bien nos données, qui évoluent trop rapidement et manquent de paramètres pour des prévisions précises. De plus, nos données ne suivent pas un comportement logarithmique. Nous nous orientons donc vers un modèle exponentiel et polynomial pour remplacer le modèle linéaire. Heureusement, R offre des outils adaptés à ce travail.



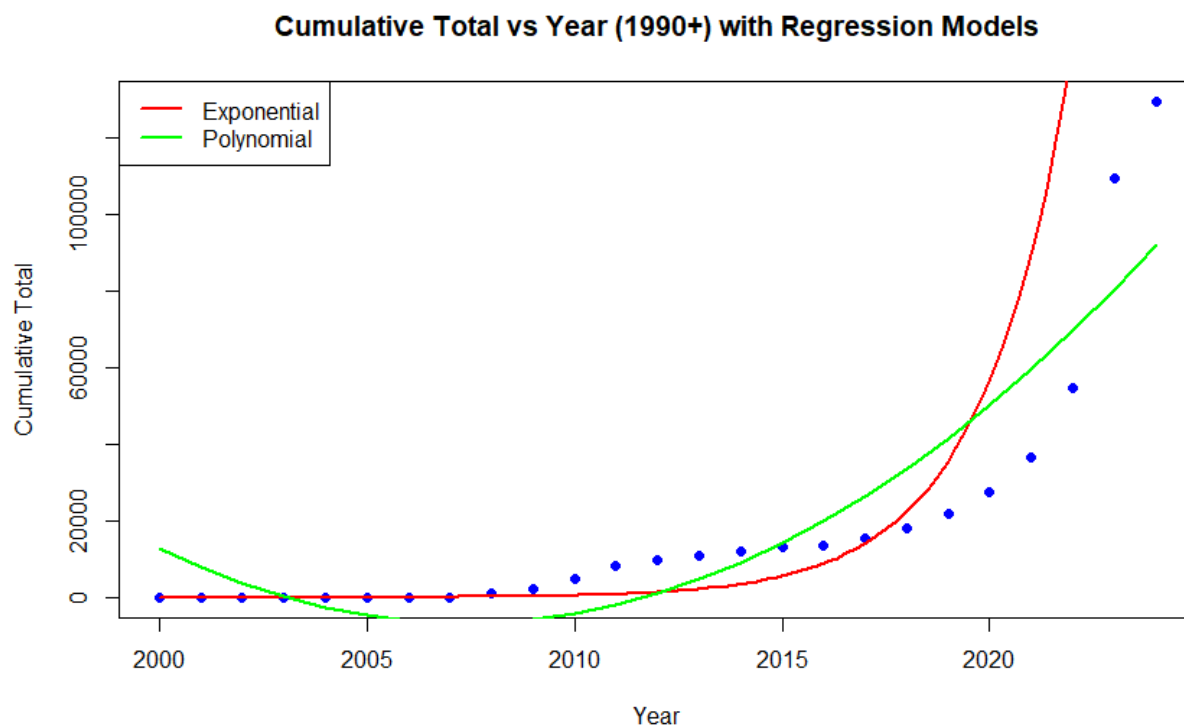
Pour le modèle exponentiel :

```
Residual standard error: 2.109 on 94 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.4394,    Adjusted R-squared:  0.4335
F-statistic: 73.69 on 1 and 94 DF,  p-value: 1.873e-13
```

Pour le modèle Poly:

```
Residual standard error: 11220 on 93 degrees of freedom  
Multiple R-squared: 0.3551, Adjusted R-squared: 0.3412  
F-statistic: 25.6 on 2 and 93 DF, p-value: 1.388e-09
```

L'augmentation des R-carré montre que les modèles exponentiel et polynomial sont plus adaptés que le modèle linéaire. Cependant, la stagnation des bornes pendant 70 ans, où l'évolution était quasi nulle, fausse les prévisions. Cette faible variation crée une variance faible, ce qui réduit la capacité des modèles à capter des tendances significatives. Ainsi, nous avons limité l'analyse aux données après 2000, concentrant l'étude sur la phase de croissance et améliorant la précision des prévisions.



Pour le modèle exponentiel :

```
Residual standard error: 1.345 on 23 degrees of freedom  
Multiple R-squared: 0.8577, Adjusted R-squared: 0.8515  
F-statistic: 138.6 on 1 and 23 DF, p-value: 3.234e-11
```

Pour le modèle Poly:

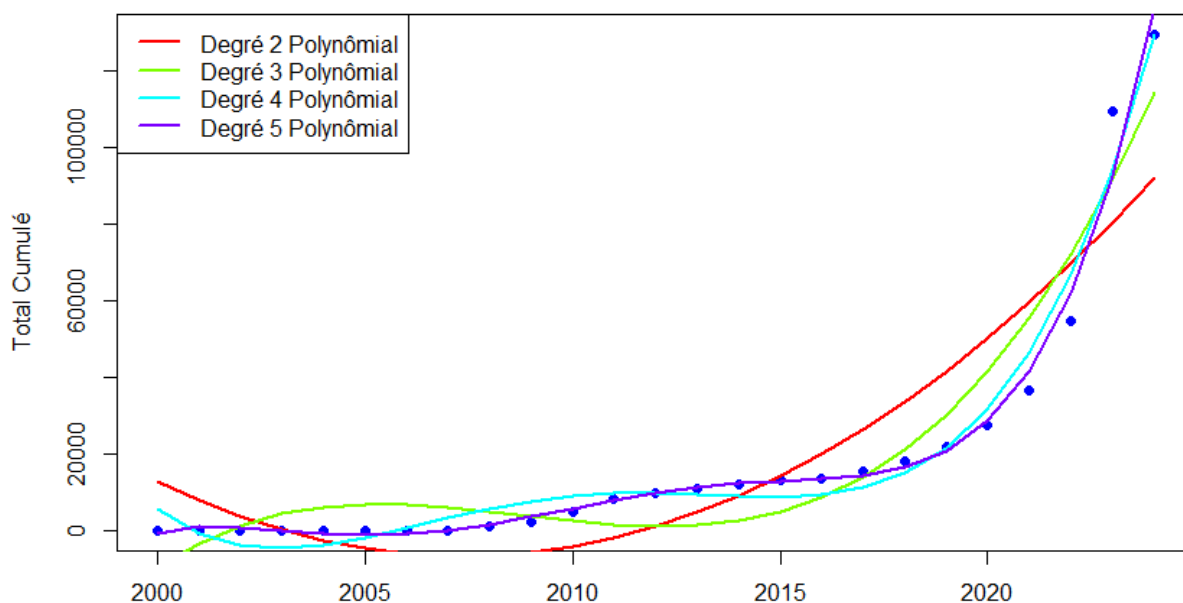
```
Residual standard error: 10200 on 22 degrees of freedom  
Multiple R-squared: 0.7808, Adjusted R-squared: 0.7608  
F-statistic: 39.18 on 2 and 22 DF, p-value: 5.621e-08
```

En retirant les données antérieures à 2000, le R^2 augmente nettement dans les deux modèles, passant de moins de 0.5 à 0.8577 pour le modèle exponentiel et 0.7808 pour le modèle polynomial. Nous pouvons maintenant procéder aux prédictions et vérifier leur précision par rapport aux données réelles d'avancement.

```
> # Prédiction avec le modèle exponentiel  
> exp_prediction <- exp(predict(exp_model, newdata = new_data))  
> print(paste("Prédiction du modèle exponentiel pour l'année", future_year, ":", exp_prediction))  
[1] "Prédiction du modèle exponentiel pour l'année 2030 : 5804609.14470385"  
>  
> # Prédiction avec le modèle polynomial  
> poly_prediction <- predict(poly_model, newdata = new_data)  
> print(paste("Prédiction du modèle polynomial pour l'année", future_year, ":", poly_prediction))  
[1] "Prédiction du modèle polynomial pour l'année 2030 : 175959.030003716"
```

Les prédictions du modèle exponentiel semblent déraisonnables, atteignant 5,804,609 pour 2030, tandis que celles du modèle polynomial, à 175,959, sont plus cohérentes. La différence étant importante, nous devons ajuster cela. Ne pouvant ajouter d'autres variables, nous allons privilégier le modèle polynomial, tout en évitant un trop grand nombre de degrés pour prévenir le sur-apprentissage. En effet, un modèle polynomial trop complexe risque de trop s'ajuster aux données d'entraînement et de perdre en précision pour de nouvelles prévisions.

Total Cumulé vs Année avec Modèles Polynômiaux



Avec l'augmentation du degré, on constate une augmentation du R^2 , ce qui est normal car le modèle suit mieux les points. Toutefois, il faut choisir le modèle le plus crédible. Pour cela, on se base sur :

1. **R^2 ajusté** : Il évalue la qualité du modèle tout en tenant compte du nombre de paramètres.
2. **Résidus** : Ils doivent être aléatoires. Une tendance systématique indique un mauvais modèle.
3. **Prédictions réalistes** : Les prédictions doivent être proches des valeurs réelles.

En combinant ces critères, on choisit le modèle équilibrant complexité et précision.

Degré du Modèle	Prédiction pour 2030	R-carré	R-carré ajusté
2	175,959	0.8048	0.7870
3	328,596	0.9152	0.9031
4	598,225	0.9713	0.9656
5	918,225	0.9838	0.9795

Avec 129 525 points ouverts en 2023 et une croissance de 30% sur 12 mois, l'objectif de 400 000 points semble difficile à atteindre. Les régions les mieux dotées sont **l'Île-de-France, Auvergne-Rhône-Alpes et Occitanie**, tandis que l'ouest et le centre de la France sont moins bien desservis. Les prédictions pour 2030 varient : le modèle polynomial de degré 3 prédit 328 596 points, tandis que le modèle de degré 4 surestime avec 598 225 points. Il semble peu probable que le gouvernement atteigne son objectif sans efforts colossaux, notamment dans les zones rurales et avec des incitations supplémentaires pour encourager le déploiement.

1. Analyse des densités locales

Voici une version plus structurée et propre en trois parties :

1. Disparités régionales

L'analyse des disparités régionales révèle que certaines régions, telles que l'Occitanie et la Bretagne, présentent une densité de bornes de recharge plus élevée que la moyenne nationale. En Bretagne, on compte 33 125 bornes pour 49 882 véhicules électriques (0,664 borne par véhicule), tandis qu'en Occitanie, la densité est de 0,35 borne pour 104 711 véhicules.

2. Facteurs explicatifs

Ces densités élevées ne sont pas le fruit du hasard, mais le résultat de politiques régionales actives visant à soutenir l'infrastructure de recharge. L'Occitanie, par exemple, a lancé le projet "Flexitanie", en partenariat avec EDF et l'ADEME, visant à installer des bornes intelligentes et bidirectionnelles.

3. Impact sur l'objectif national

Ces initiatives locales ont un impact direct sur la couverture des bornes de recharge. Elles illustrent la nécessité de stratégies régionales pour atteindre l'objectif national de 400 000 bornes d'ici 2030, en particulier dans les zones moins desservies.

Source: <https://www.laregion.fr/Dispositif-d-aides-pour-l-installation-de-50-bornes-de-recharge-bidirectionnelles-et>

D. Détails du dispositif Flexitanie

Selon le communiqué officiel de la région Occitanie, l'aide financière accordée dans le cadre de Flexitanie prend la forme de subventions unitaires :

- 3 000 euros par borne bidirectionnelle installée
- 1 500 euros par borne intelligente installée

Ces subventions sont cumulables avec d'autres aides nationales, ce qui incite davantage les entreprises à investir dans ces infrastructures. Toutefois, les bornes de recharge classiques ne sont pas éligibles à ce dispositif. Les bornes doivent impérativement être installées sur des sites de travail disposant de bâtiments tertiaires ou industriels conséquents.

Cette approche ciblée explique en partie pourquoi l'Occitanie se positionne parmi les régions les mieux dotées en bornes de recharge. Ce modèle pourrait inspirer d'autres régions cherchant à combler leur retard en matière d'infrastructures de recharge. En parallèle, la Bretagne bénéficie également de politiques locales favorisant l'installation de bornes, bien que les détails spécifiques de ces initiatives méritent une analyse approfondie.

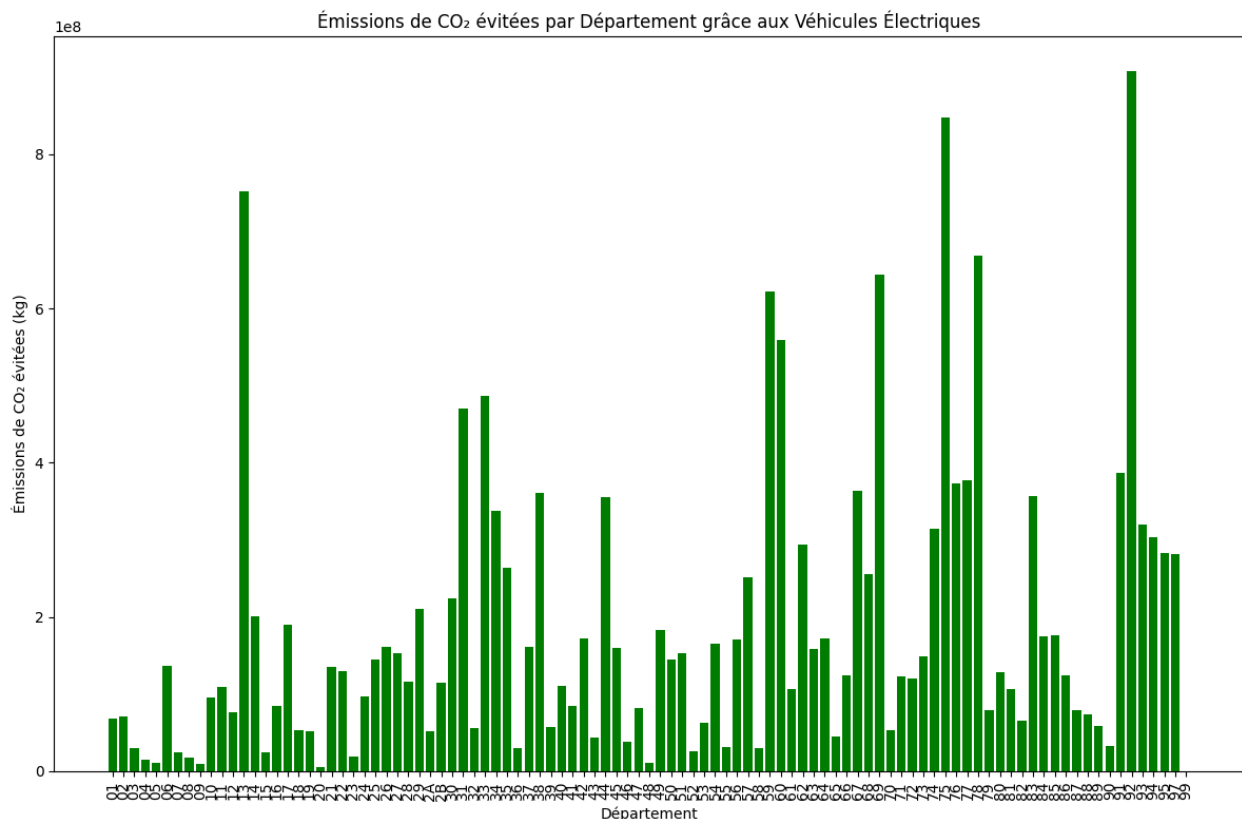
1. Implications pour la transition énergétique

Les initiatives locales comme Flexitanie montrent l'importance d'une approche régionale pour répondre aux besoins spécifiques. Elles favorisent l'installation de bornes dans des lieux stratégiques, réduisant ainsi les disparités territoriales.

Toutefois, des défis persistent, notamment en milieu rural et dans les zones à faibles revenus. Une meilleure coordination entre initiatives locales et nationales pourrait accélérer le déploiement des bornes et garantir un accès équitable aux infrastructures sur tout le territoire.

Analyse des bénéfices environnementaux des véhicules électriques

Il est essentiel, en complément des analyses précédentes, d'évaluer l'impact environnemental des véhicules électriques, notamment la réduction des émissions de CO₂. Une analyse des données par département a permis de quantifier les émissions évitées grâce à la transition vers l'électrique.



1.1. Analyse des bénéfices environnementaux

Le graphique ci-dessous illustre les émissions de CO₂ évitées par département grâce aux véhicules électriques. Les départements les plus performants, comme **Seine-Saint-Denis (93)** et **Paris (75)**, se démarquent par une contribution environnementale majeure, dépassant respectivement **80 000 tonnes de CO₂/an**. Ces résultats reflètent à la fois la densité des populations urbaines et les politiques favorisant la transition énergétique dans ces zones.

Cependant, l'analyse met également en évidence des **inégalités régionales** importantes. Plusieurs départements enregistrent des réductions faibles, voire négligeables, en raison d'un faible nombre de véhicules électriques ou d'un manque d'infrastructures adaptées. Ces disparités régionales soulignent la nécessité d'investissements accrus dans les infrastructures de recharge pour maximiser les bénéfices environnementaux à l'échelle nationale.

1.2. Recommandations basées sur les résultats

1. **Augmenter l'accès aux infrastructures de recharge dans les départements sous-équipés** pour encourager l'adoption des véhicules électriques.
2. **Renforcer les incitations fiscales** et les subventions dans les zones rurales pour réduire l'écart avec les départements plus performants.
3. **Suivre régulièrement les tendances des émissions évitées** pour ajuster les politiques locales en fonction des besoins spécifiques de chaque région.

Clustering des départements en fonction de la transition énergétique

Après avoir analysé les émissions de CO₂ évitées par département grâce aux véhicules électriques, il est important d'aller plus loin en identifiant des **patterns régionaux** et des groupes homogènes de départements. Pour cela, une méthode de **clustering (K-Means)** a été utilisée pour regrouper les départements en fonction de leurs performances environnementales.

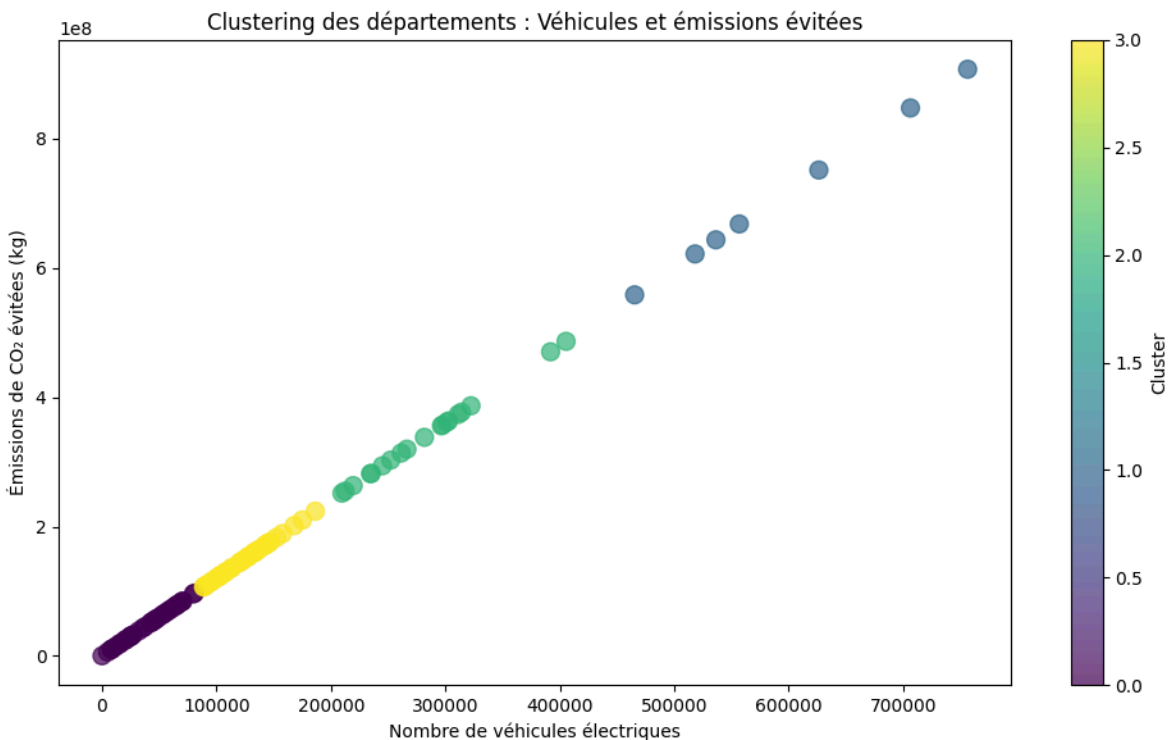
1.3. Méthodologie

Nous avons pris les données agrégées des départements que nous avons déjà calculées dans l'analyse précédente :

- Nombre de véhicules électriques rechargeables.
- Émissions de CO₂ évitées (en kg).

Ensuite, nous avons normalisé ces données pour que les échelles soient comparables (car les émissions sont très grandes par rapport au nombre de véhicules).

Ces deux indicateurs permettent de représenter la contribution environnementale de chaque département. Le modèle a identifié **4 clusters distincts**, visualisés sur le graphique ci-dessous.



Le graphique met en évidence des différences significatives entre les clusters :

- **Cluster 3 (bleu) :**

Ces départements, comme **Paris (75)** et **Hauts-de-Seine (92)**, sont les **leaders** de la transition énergétique. Ils présentent :

- Un nombre élevé de véhicules électriques (> 500 000).
- Des émissions de CO₂ évitées dépassant **8 millions de kg/an**. Leur performance peut être attribuée à une forte densité de population, des infrastructures avancées et des politiques incitatives.

- **Cluster 0 (violet) :**

Ces départements enregistrent les **plus faibles performances**. Ils se caractérisent par :

- Un nombre de véhicules électriques inférieur à 100 000.
- Des émissions de CO₂ évitées limitées (< 2 millions de kg/an). Il s'agit souvent de zones rurales ou sous-équipées, nécessitant des investissements prioritaires dans les infrastructures de recharge.

- **Clusters 1 (jaune) et 2 (vert) :**

Ces groupes représentent des départements **en transition**. Bien qu'ils aient des performances intermédiaires, ils montrent un potentiel important si des mesures ciblées sont mises en place.

1.4. Implications stratégiques

Les résultats de cette analyse révèlent des **disparités régionales importantes**. Pour accélérer la transition énergétique à l'échelle nationale, il est essentiel de :

- **Prioriser les clusters intermédiaires (1 et 2)** pour accélérer leur progression.
- **Soutenir les leaders (cluster 3)** en renforçant leurs infrastructures pour maximiser leur impact.
- **Cibler les départements du cluster 0** avec des politiques adaptées, comme des subventions, pour réduire les écarts.

Analyse des Ratios par Habitant : Une Perspective Équitable

Après avoir analysé les performances départementales en termes absolus (nombre de véhicules électriques et émissions de CO₂ évitées), il est nécessaire de les évaluer proportionnellement à la population. Cette approche permet de prendre en compte les disparités démographiques et d'examiner deux indicateurs clés :

- **Véhicules électriques par habitant** : reflet de l'adoption locale des VE.
- **CO₂ évité par habitant** : mesure des bénéfices environnementaux par individu.

Cette analyse permet de :

- Identifier les départements performants en fonction de leur population.
- Repérer les zones à fort potentiel souvent invisibles dans une analyse absolue.
- Comprendre les opportunités et défis propres à chaque territoire.

2. Résultats Clés

Départements leaders : Les Hauts-de-Seine (92) et l'Oise (60) se distinguent par des ratios élevés de véhicules électriques et de CO₂ évité par habitant, témoignant de l'efficacité des politiques publiques et des infrastructures avancées.

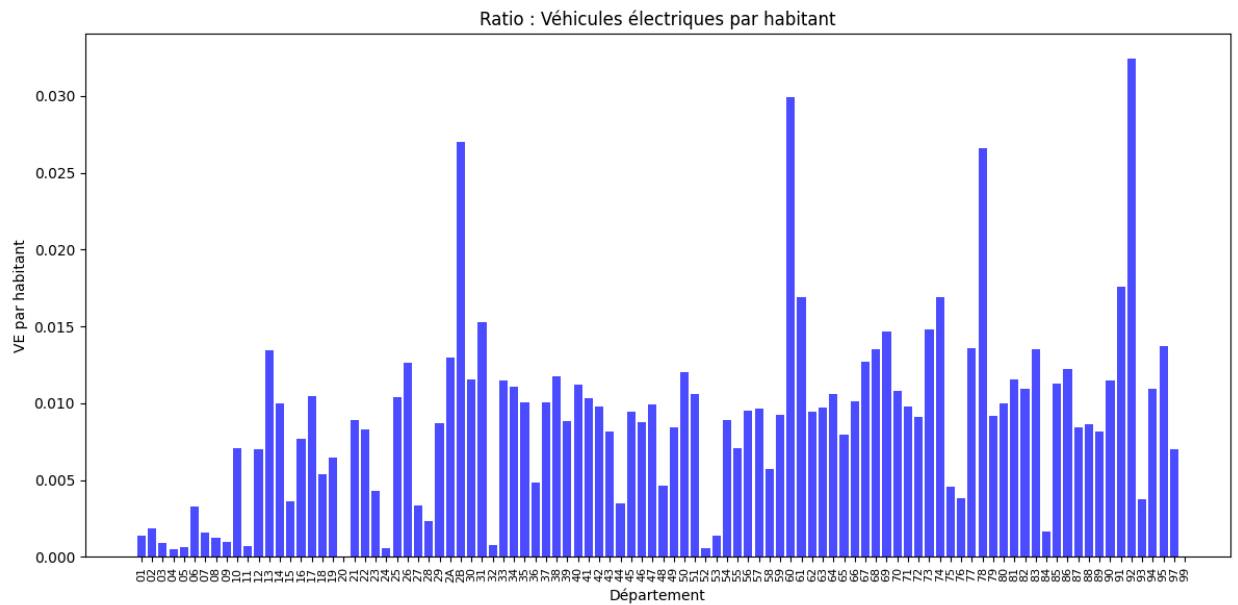
Départements intermédiaires : La Haute-Corse (2B) et les Yvelines (78) montrent de bons résultats avec des ratios élevés malgré une population plus petite, prouvant que des efforts locaux ciblés peuvent avoir un impact environnemental significatif.

Zones rurales en difficulté : Les départements du cluster 0, les moins performants, ont des ratios faibles, soulignant l'urgence d'investissements pour encourager l'adoption des véhicules électriques et réduire les disparités régionales.

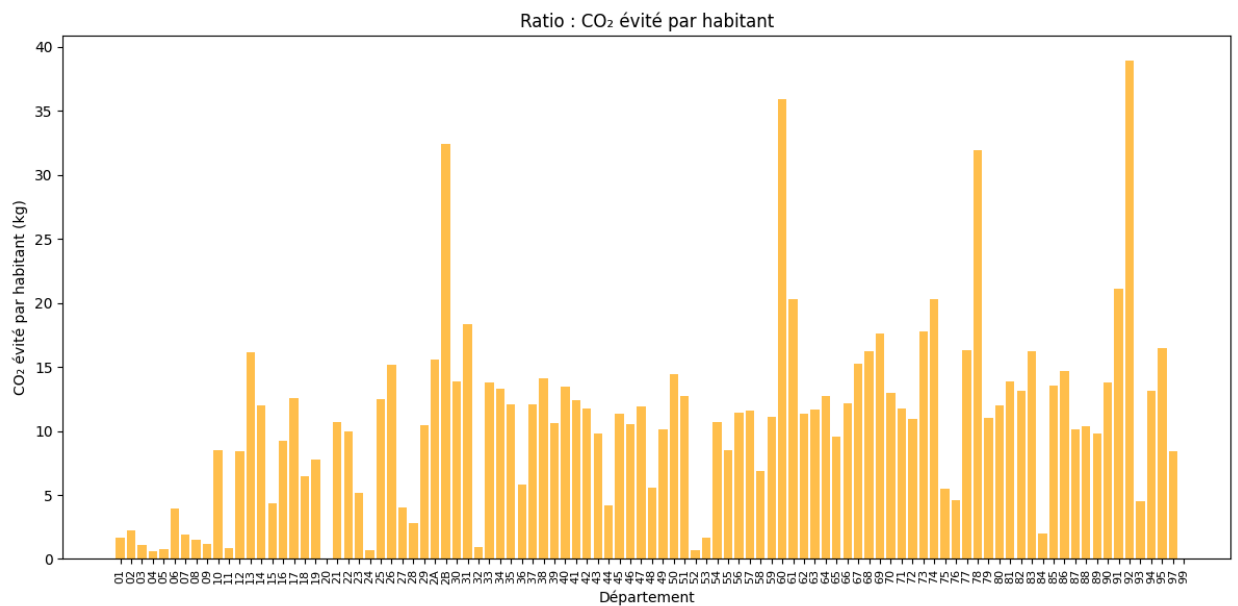
3. Recommandations Stratégiques

1. **Renforcer les leaders pour maximiser l'impact** : Les **Hauts-de-Seine (92)** et **l'Oise (60)** doivent continuer à recevoir un soutien stratégique afin de maintenir leur dynamique positive et servir de modèles pour d'autres départements.
2. **Capitaliser sur les opportunités locales** : La **Haute-Corse (2B)** et les **Yvelines (78)** montrent que des résultats exemplaires sont possibles grâce à des efforts ciblés. Ces départements pourraient bénéficier de programmes pilotes pour amplifier leurs succès.
3. **Investir dans les départements en retard** : Les départements ruraux doivent être priorités pour des initiatives telles que des subventions pour les bornes de recharge et des incitations fiscales, afin d'accélérer leur transition.

- **Graphique 1 : Ratio de Véhicules Électriques par Habitant**



- **Graphique 2 : Ratio de CO₂ Évité par Habitant**



4. Implications Futures

Cette analyse met en évidence la nécessité de stratégies locales adaptées pour assurer une transition énergétique équilibrée et durable à l'échelle nationale.

E. Conclusion

La transition énergétique en France, bien que stratégique et ambitieuse, révèle des avancées significatives mais inégalement réparties à travers le territoire. Ce projet, axé sur l'évaluation de l'efficacité des politiques publiques et des facteurs influençant l'adoption des véhicules électriques (VE), met en lumière des défis critiques ainsi que des leviers d'action essentiels pour atteindre les objectifs fixés à l'horizon 2030.

1. Progrès réalisés et écarts persistants

Les politiques publiques, avec des objectifs tels que l'installation de 400 000 bornes de recharge d'ici 2030, ont permis une progression remarquable dans les zones urbaines et densément peuplées, comme Paris et l'Île-de-France. Cependant, les projections actuelles montrent qu'à ce rythme, le seuil des 400 000 bornes ne sera probablement pas atteint, avec une estimation réaliste d'environ 328 596 bornes. Les zones rurales, souvent oubliées, souffrent d'un manque d'infrastructures qui freine l'adoption des VE et renforce les disparités géographiques et sociales.

2. Efficacité des subventions et incitations fiscales

Les incitations économiques, bien qu'efficaces dans les régions à hauts revenus, révèlent une répartition inéquitable. Les populations à faibles revenus et les zones périphériques, qui ont un besoin urgent de ces aides pour compenser leur retard, restent sous-dotées. Une redistribution stratégique de ces subventions, orientée vers les zones sous-équipées, pourrait réduire les inégalités et accélérer la transition énergétique dans les régions en difficulté.

3. Rôle des investissements publics et privés

Les analyses ont démontré que l'efficacité des investissements est maximisée lorsqu'ils ciblent des zones stratégiques identifiées grâce à des modèles prédictifs. Des initiatives innovantes, comme le projet Flexitanie en Occitanie, prouvent que des approches technologiques et collaboratives adaptées au contexte local peuvent avoir un impact

durable. Ces projets doivent être reproduits à l'échelle nationale pour combler les écarts régionaux.

4. Enjeux environnementaux et sociaux

Les bénéfices environnementaux liés aux véhicules électriques, en termes de réduction des émissions de CO₂, sont significatifs dans les départements leaders comme Paris. Cependant, ces bénéfices restent largement sous-exploités dans les zones rurales et à faibles revenus, où l'adoption des VE est limitée par l'absence de bornes de recharge accessibles. Une planification nationale intégrée, accompagnée d'un suivi rigoureux, est cruciale pour amplifier l'impact environnemental à l'échelle nationale.

5. Vers une transition énergétique équitable et durable

Pour répondre pleinement aux problématiques identifiées, il est indispensable de :

1. **Accélérer le déploiement des infrastructures dans les zones sous-dotées**, en priorisant les départements ruraux et les clusters identifiés comme les moins performants.
2. **Cibler les subventions et incitations fiscales** vers les populations défavorisées et les régions isolées, afin de garantir une adoption plus équitable des VE.
3. **Renforcer la coordination nationale et locale** pour harmoniser les efforts, tout en favorisant des solutions innovantes comme les bornes bidirectionnelles.
4. **Suivre les progrès et ajuster les politiques en temps réel**, en tenant compte des indicateurs clés tels que les émissions de CO₂ évitées, la densité des bornes, et l'adoption des VE.

En conclusion, la France dispose des outils et des ressources nécessaires pour réussir sa transition énergétique, mais cette réussite dépendra de sa capacité à réduire les disparités régionales et à impliquer l'ensemble des acteurs, publics comme privés. Une transition énergétique équitable, innovante et ambitieuse n'est pas seulement un objectif écologique, mais également un impératif social et économique pour construire un avenir durable pour tous.