Prédiction des émissions de CO_2 des véhicules

Sabine Lohier
sb.lohier@gmail.com

DATAGONG

Objectifs :

- Réaliser une analyse exploratoire des données
- Bâtir une modélisation prédictive des émissions de CO_2 des véhicules

Les données :

- Liste des références des véhicules commercialisés en France de 2001 à 2015 ainsi que leurs caractéristiques techniques, administratives, leurs émissions en polluants et gaz à effet de serre (CO, CO_2, NOx ..)
- Provenance : ADEME

Données labellisées et y_i continus → **Modèle de régression - apprentissage supervisé**
Mise en place d'un modèle explicable → **Modèle de régression linéaire**

La base contient 55 044 lignes et 26 colonnes :

- 13 variables catégorielles
- 13 variables numériques

Suppression

- ➢ **Doublons :** 7 doublons purs
- ➢ **Target manquante :** 34 occurrences, véhicules 100 % électriques

➢ **Séparation de la base en données** d'entraînement (75%) et en données de test (25%)

Variables catégorielles :

- Identification et données administratives
  - *Marque, désignation du modèle et désignation commerciale* `lib_mrq` `lib_mod_doss` `lib_mod` `dscom`
  - *Code National d'Identification du Type du véhicule* `cnit` *et Type - Variante- Version* `tvv`
- Caractéristiques techniques :
  - *Type de carburant* `cod_cbr`, *hybridité* `hybride`
  - *Type de transmission et nombre de vitesses* `typ_boite_nb_rapp`
  - *Type de gamme* `gamme` *et de carrosserie* `Carrosserie`
- Caractéristiques environnementales :
  - *Norme Euro* `champ_v9`
- Autre : *Date de mise à jour* `date_maj`

Variables catégorielles :

- Identification et données administratives
  - *Marque, désignation du modèle et désignation commerciale* `lib_mrq` `lib_mod_doss` `lib_mod_dscom`
  - *Code National d'Identification du Type du véhicule* `cnit` *et Type - Variante- Version* `tvv`
- Caractéristiques techniques :
  - *Type de carburant* `cod_cbr`, *hybridité* `hybride`
  - *Type de transmission et nombre de vitesses* `typ_boite_nb_rapp`
  - *Type de gamme* `gamme` *et de carrosserie* `Carrosserie`
- Caractéristiques environnementales :
  - ***Norme Euro*** `champ_v9`
- Autre : ***Date de mise à jour*** `date_maj`

→ **2 variables présentent des valeurs manquantes soit 7.2%**

Variables quantitatives:

- Caractéristiques techniques :
  - *Puissance administrative* `puiss_admin_98`, *puissance maximale* `puiss_max`
  - *Masse en ordre de marche minimale* `masse_ordma_min` *et maximale* `masse_ordma_max`
- Consommations :
  - *en milieu urbain* `conso_urb` , *extra urbain* `conso_exurb` *et mixte* `conso_mixte`
- Caractéristiques environnementales :
  - *Émissions des polluants : CO* `co_typ_1`, *hydrocarbures imbrûlés* `hc` , *Particules* `ptcl`, *NOx* `nox` `hcnox`
  - *Émissions en CO2* `co2`

Variables quantitatives:

- Caractéristiques techniques :
  - *Puissance administrative* `puiss_admin_98`, *puissance maximale* `puiss_max`
  - *Masse en ordre de marche minimale* `masse_ordma_min` *et maximale* `masse_ordma_max`
- Consommations :
  - ***en milieu urbain*** `conso_urb` ***, extra urbain*** `conso_exurb` *et mixte* `conso_mixte`
- Caractéristiques environnementales :
  - ***Émissions des polluants : CO*** `co_typ_1`***, hydrocarbures imbrûlés*** `hc` ***, Particules*** `ptcl`***, NOx*** `nox` `hcnox`
  - ***Émissions en CO2*** `co2`

→ **7 variables présentent des valeurs manquantes soit 8.1%**

Suppressions des variables

Id. et données admin.	~~*Marque, désignation du modèle et désignation commerciale* `lib_mrq` `lib_mod_doss` `lib_mod_dscom`~~ ~~*Code National d'Identification du Type du véhicule* `cnit` ~~*et Type - Variante - Version* `tvv`~~
Caract. techniques	*Type de carburant* `cod_cbr`*, hybridité* `hybride` *Type de transmission et nombre de vitesses* `typ_boite_nb_rapp` *Type de gamme* `gamme` *et de carrosserie* `Carrosserie` ~~*Puissance administrative* `puiss_admin_98`~~*, puissance maximale* `puiss_max` *Masse minimale* `masse_ordma_min` *et maximale* `masse_ordma_max` *en ordre de marche*
Conso.	*Consommation en carburant en milieu urbain* `conso_urb` *, extra urbain* `conso_exurb` *et mixte* `conso_mixte`
Caract. env.	~~*Norme Euro* `champ_v9`~~ ~~*Émissions des polluants : CO* `co_typ_1`~~*, hydrocarbures imbrûlés* ~~`hc`~~ *, Particules* ~~`ptcl`~~*, NOx* ~~`nox` `hcnox`~~ *Émissions en CO2* `co2`
Autre	~~*Date de mise à jour* `date_maj`~~

➢ **Le type de carburant** `cod_cbr` :

9 modalités incluant 2 aspects fonctionnels des véhicules :

- Le carburant fossile utilisé,
- Leur nature hybride ou non.

Carburant	Total des véhicules	% des véhicules
DIESEL	**37114**	**90.0%**
ESSENCE	4 068	9.8%
AUTRE	70	0.2%

➢ **Le type de carburant** `cod_cbr` :

9 modalités incluant 3 aspects fonctionnels des véhicules :

- Le carburant fossile utilisé,
- Leur nature hybride ou non

→ 90 % des véhicules fonctionnent au gasoil.

➢ **La nature hybride** `hybridité` :

Hybride	Total des véhicules	% des véhicules
non	**40 971**	**99.3%**
oui	281	0.7%

➢ **Le type de carburant** `cod_cbr` :

9 modalités incluant 3 aspects fonctionnels des véhicules :

- Le carburant fossile utilisé,
- Leur nature hybride ou non

→ 90 % des véhicules fonctionnent au gasoil.

➢ **La nature hybride** `hybride` :

→ 99% des véhicules ont un moteur hybride.

➢ **Le type de transmission et le nombre de vitesses** `typ_boite_nb_rapp` :

14 modalités constituées:

- du mode de transmission (“A” pour automatique, “M” pour manuelle …)
- Suivi par le nombre de vitesses

Transmission	Total des véhicules	% des véhicules
MANUELLE	**24 616**	**59.7%**
AUTOMATIQUE	16 325	39.6%
AUTRE	311	0.7%

➢ **La gamme** `gamme`:

6 catégories désignant la montée en gamme

→ 88.5 % des véhicules sont de gamme **moyenne inférieure** à **moyenne supérieure**

type de gamme	Total des véhicules	% des véhicules
ECONOMIQUE	175	0.5%
INFÉRIEURE	791	1.9%
MOY-INFER	**25 157**	**60.9%**
MOY-SUPER	**11 371**	**27.6%**
SUPÉRIEURE	1 098	2.7%
LUXE	2 660	6.4%

➢ **La gamme** `gamme`:

6 catégories désignant la montée en gamme.

→ 88.5 % des véhicules sont de gamme **moyenne inférieure** à **moyenne supérieure**

➢ **La carrosserie** `Carrosserie` : 10 modalités

type de carrosserie	Total des véhicules	% des véhicules
MINISPACE	99	0.2%
MONOSPACE COMPACT	244	0.6%
COMBISPACE	178	0.4%
BERLINE	**3 286**	**8.0%**
COUPÉ	649	1.6%
CABRIOLET	395	1%
BREAK	881	2.1%
MONOSPACE	43	0.1%
TS TERRAINS/CHEMINS	819	2.0%
MINIBUS	**34 658**	**84.0%**

➢ **La gamme** `gamme`:

6 catégories désignant la montée en gamme.

→ 88.5 % des véhicules sont de gamme **moyenne inférieure** à **moyenne supérieure**

➢ **La carrosserie** `Carrosserie` : 10 modalités

→ 84 % des véhicules sont des ‘minibus’ et seulement 8% des ‘berlines’

type de carrosserie	Total des véhicules	% des véhicules
MINISPACE	99	0.2%
MONOSPACE COMPACT	244	0.6%
COMBISPACE	178	0.4%
BERLINE	**3 286**	**8.0%**
COUPÉ	649	1.6%
CABRIOLET	395	1%
BREAK	881	2.1%
MONOSPACE	43	0.1%
TS TERRAINS/CHEMINS	819	2.0%
MINIBUS	**34 658**	**84.0%**

➢ **La gamme** `gamme`:

6 catégories désignant la montée en gamme.

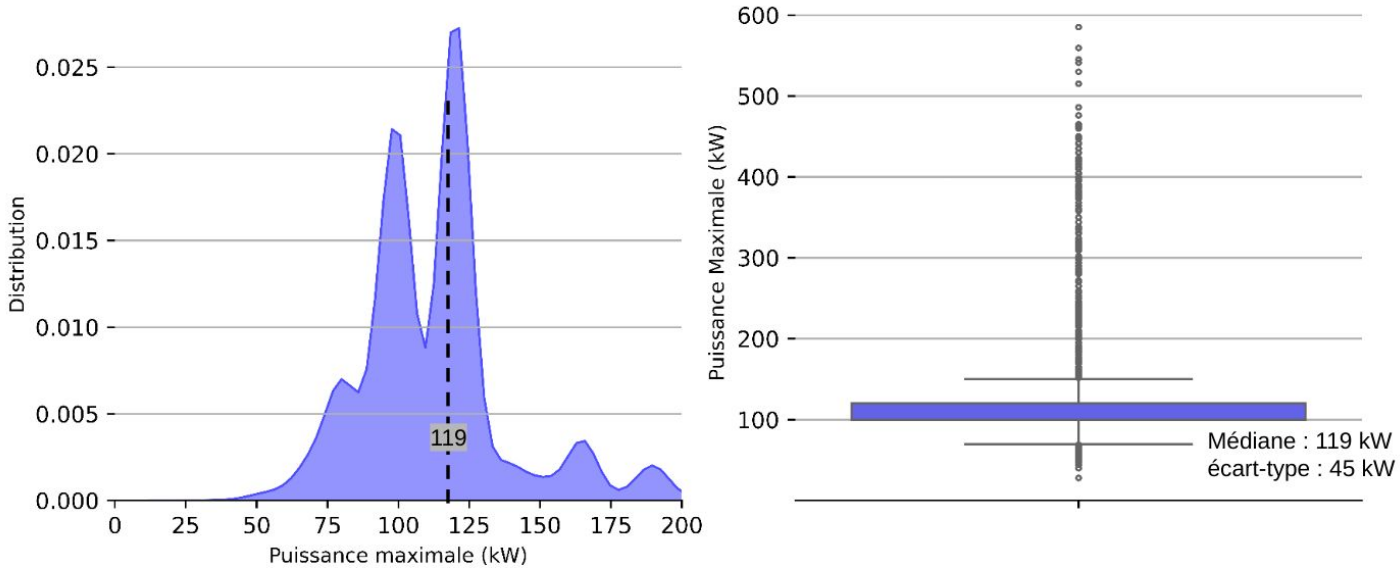
→ 88.5 % des véhicules sont de gamme **moyenne inférieure** à **moyenne supérieure**

➢ **La carrosserie** `Carrosserie` : 10 modalités

→ 84 % des véhicules sont des 'minibus' et seulement 8% des 'berlines'

type de carrosserie	MINISPACE	MONOSPACE COMPACT	COMBISPACE	**BERLINE**	COUPE	CABRIOLET	BREAK	MONOSPACE	TS TERRAINS	**MINIBUS**	total
DIESEL	*0.1%*	0.5%	0.4%	**4.4%**	0.4%	0.3%	1.5%	0.1%	1.3%	**91.0%**	100%
ESSENCE	1.3%	1.7%	0.7%	**39.9%**	12.5%	7.0%	8.2%	0.1%	7.7%	**20.9%**	100%

➢ **La puissance maximale** `puiss_max`:

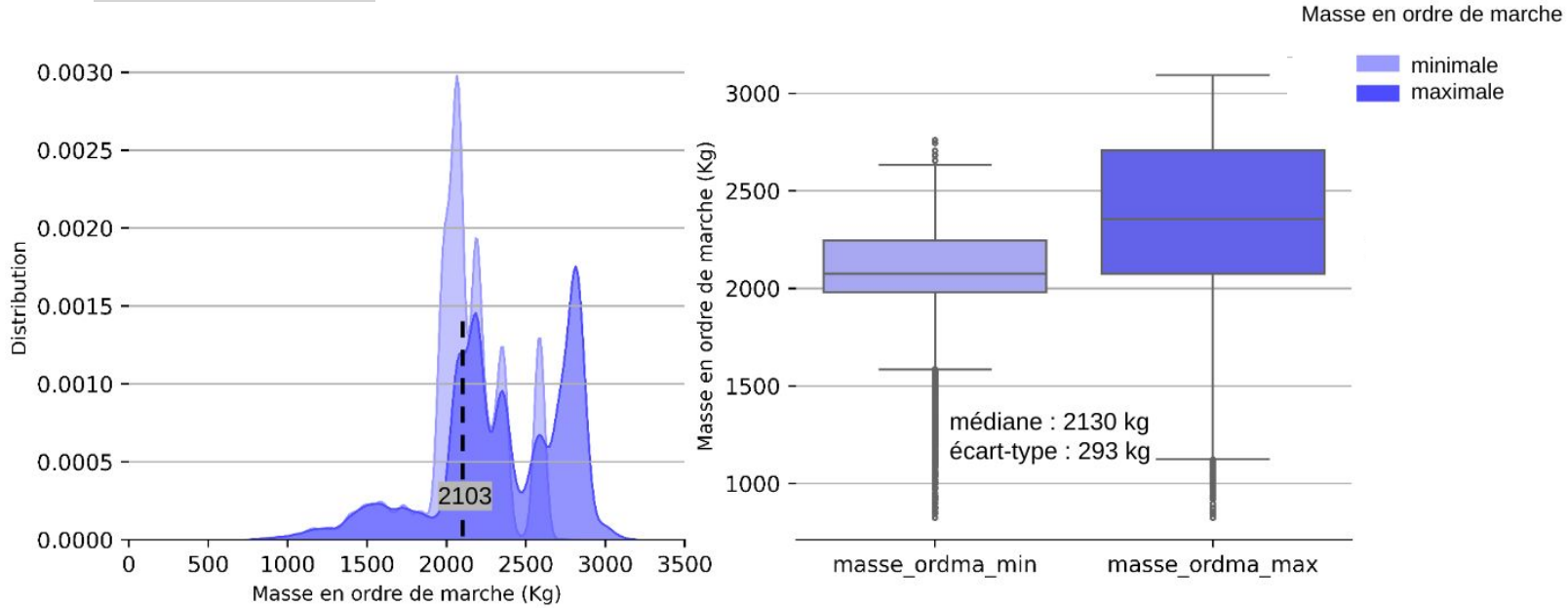


Distribution de la puissance maximale des véhicules.

Outliers

- `puiss_max` > 500 kW (11 observations)
- `puiss_max` < 40 kW (1 observation)

➢ **La masse** `masse_ordma_min`:

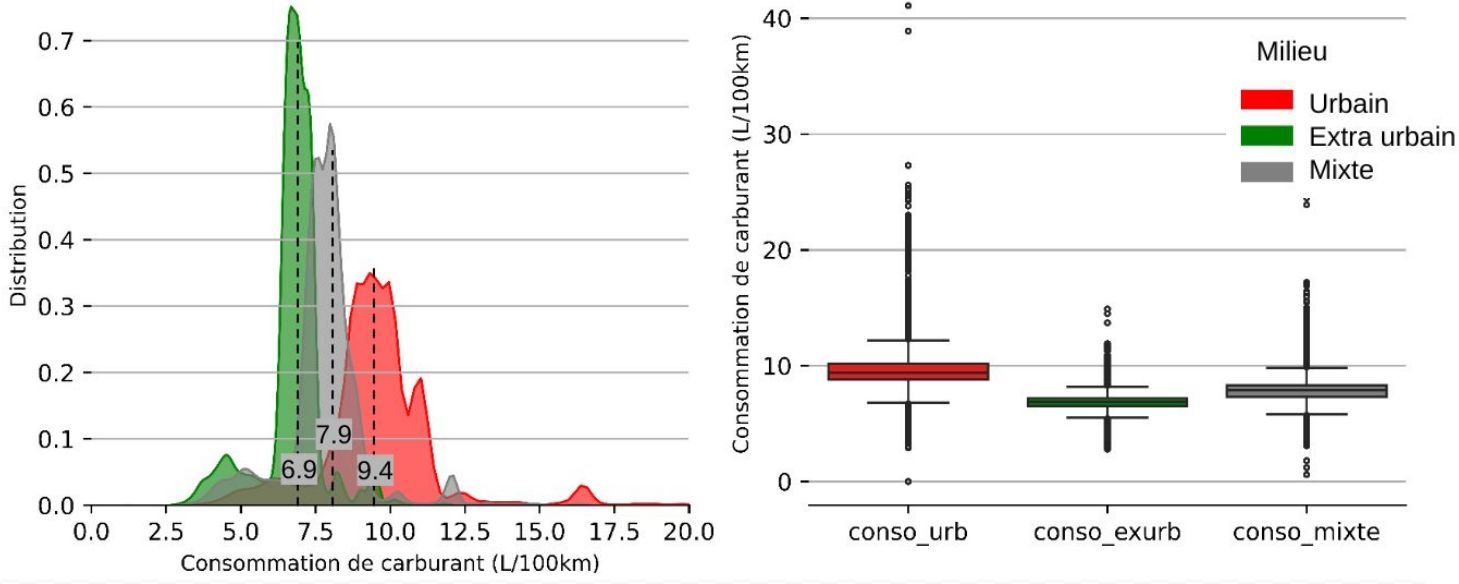


Distribution de la masse minimale et maximale en ordre de marche des véhicules.

- Masse minimale médiane élevée : due à une forte représentativité des véhicules lourds

Note : Seule la masse minimale est retenue pour la suite de l'analyse

➢ **Les consommations** `conso_urb` , `conso_exurb` , `conso_mixte`



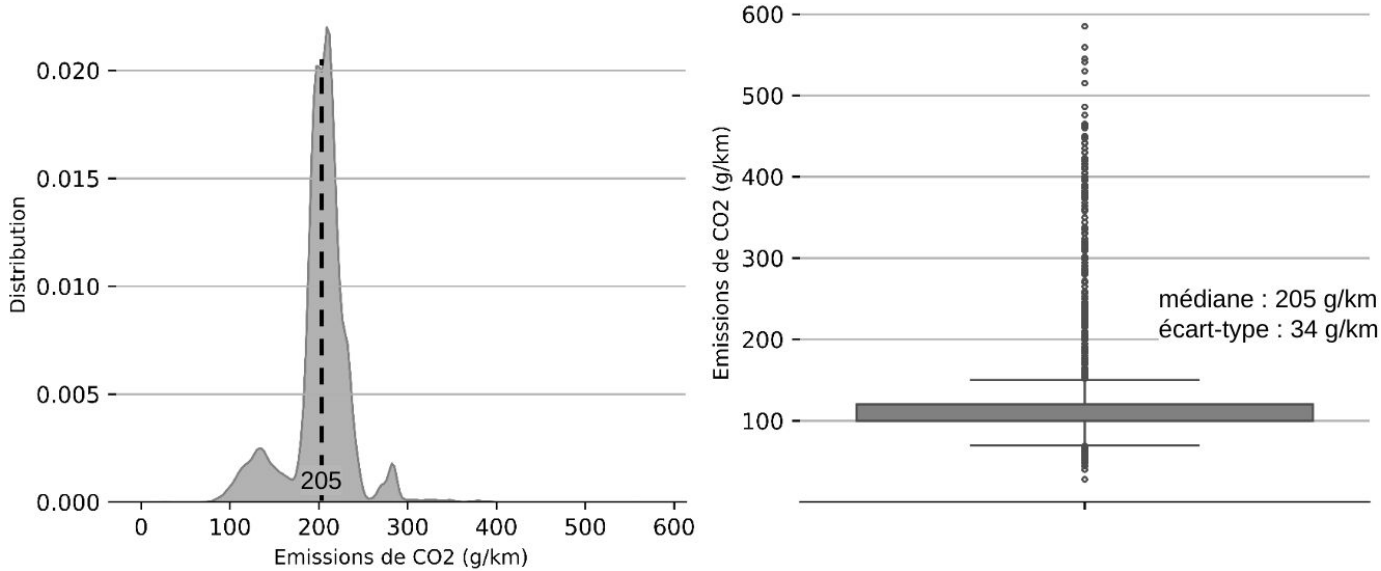
Distribution de la consommation urbaine, extra urbaine, mixte de carburant (en L/100km)

Outliers

- `conso_mixte` > 20 L/100km (2 observations)
- `conso_mixte` < 3 L/100km (4 observations)

Note : Seule la consommation mixte est retenue pour la suite de l'analyse

➢ Les émissions de co2 `co2`:

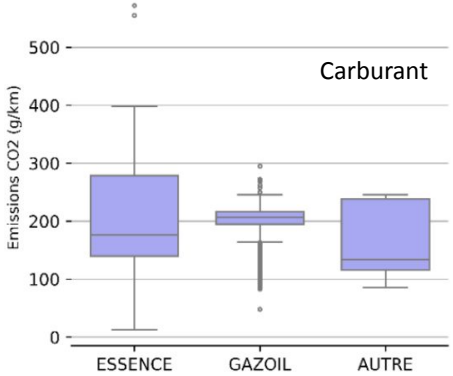


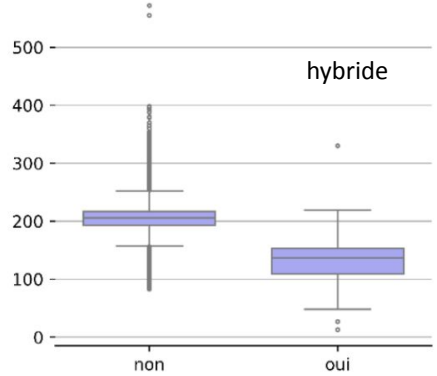
Distribution des émissions de CO2 des véhicules.

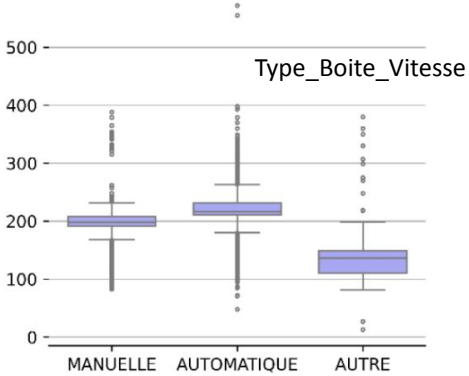
Outliers

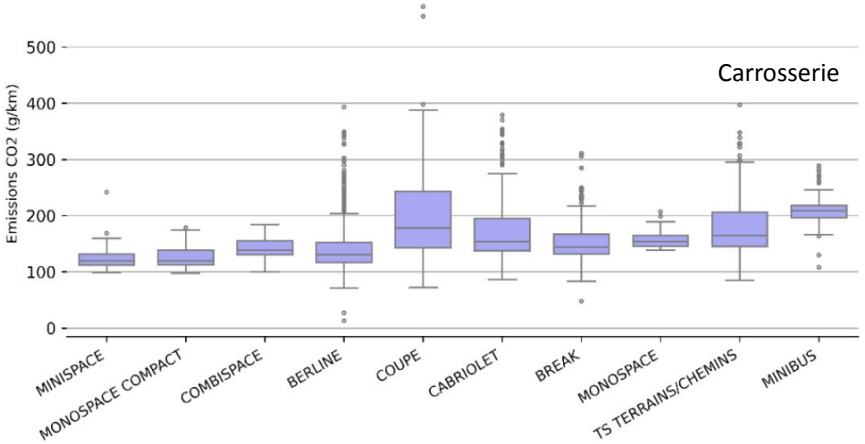
- `co2` > 500 g/km (2 observations)
- `co2` < 40 g/km (3 observations)

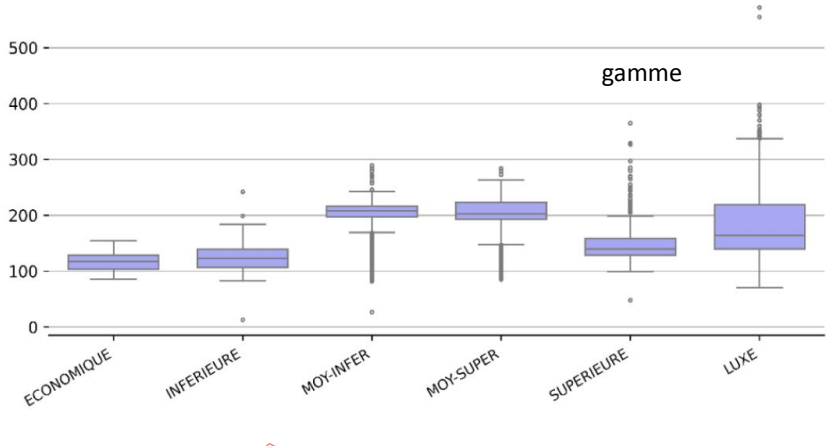
➢ Émissions de C02 vs les modalités des variables catégorielles :



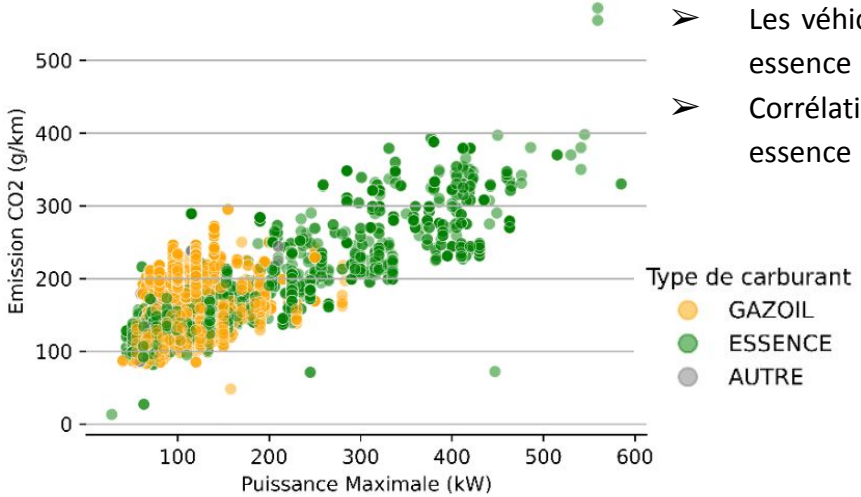




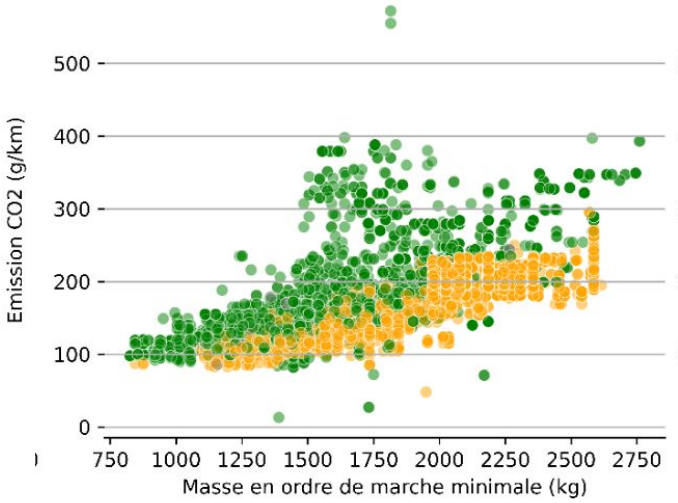




➢ Emissions de C02 vs variables quantitatives :

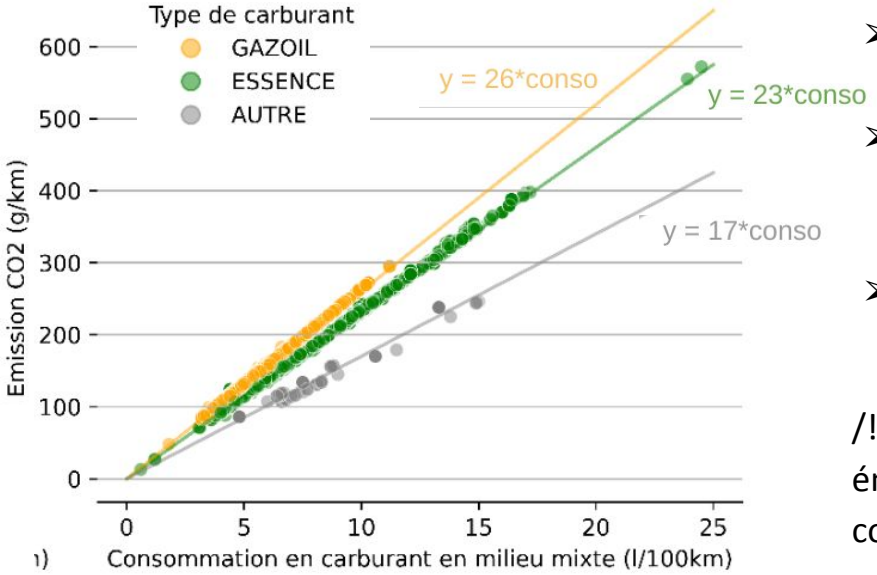


- ➢ Les véhicules dont puiss_max > 300 kW ne sont que des véhicules à moteur essence
- ➢ Corrélation entre émissions de CO2 et la puissance max pour les véhicules essence



- ➢ Bonne corrélation en les émissions de CO2 et la masse
- ➢ A masse égale, les véhicules essence émettent plus de CO2 que les véhicules diesel
- ➢ 2 groupes d'outliers :
  - 2 outliers pour lesquels CO2 > 500 g/km
  - 7 outliers pour lesquels CO2 < 80g/km (dont 3 déjà définis précédemment + 4 véhicules hybrides rechargeables)

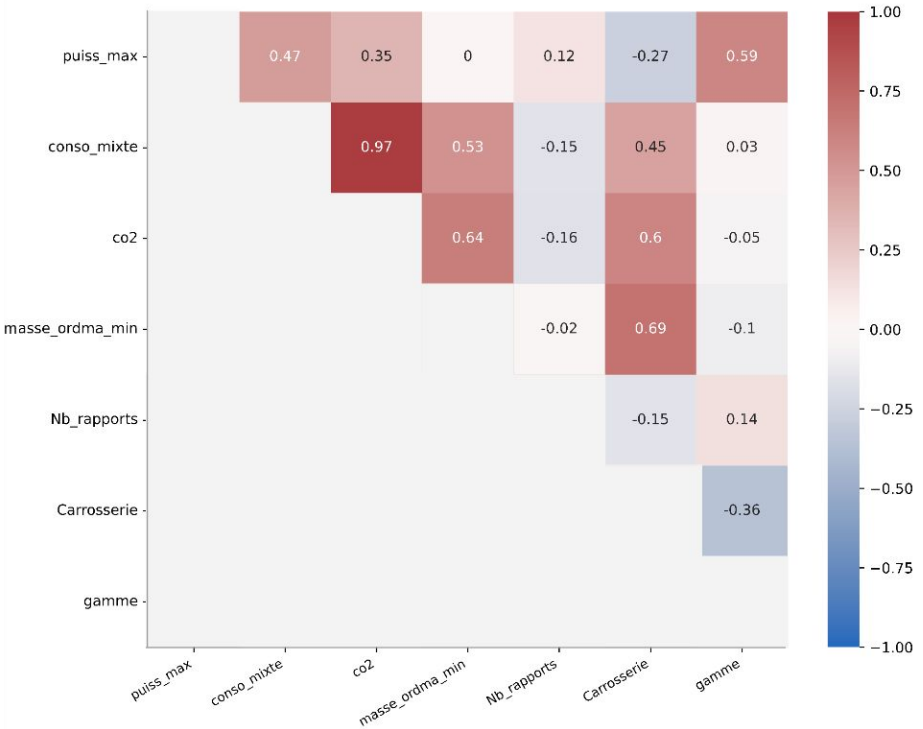
➢ Émissions de C02 vs variables quantitatives :



- ➢ Les véhicules **diesel** consomment moins que les véhicules **essence**
- ➢ Excellente corrélation entre la consommation de carburant et les émissions de CO2 selon les différents carburants utilisés
- ➢ À consommation équivalente, les véhicules à moteurs diesel ont tendance à émettre légèrement plus de CO2

/!\ Les observations approchent au plus près la relation entre les émissions de CO2 et la consommation de carburant en considérant une combustion parfaite du carburant

➢ Matrice de Corrélation



➢ Les émissions de CO2 sont très fortement corrélées à la consommation mixte (coef. = 0.97), suivi par la masse(coef = 0.53), le type de carrosserie, et plus faiblement à la puissance maximale (coef = 0.35).

➢ On observe de fortes corrélations entre variables explicatives, par exemple entre la consommation et la masse (0.53), la puissance (0.47) et la carrosserie (0.45).

➢ **Sélection des variables explicatives :**

- *Type de carburant* `cod_cbr`
- *hybridité* `hybride`
- *Type de transmission et nombre de vitesses* `typ_boite_nb_rapp`
- *Type de gamme* `gamme`
- *Type de carrosserie* `Carrosserie`
- *puissance maximale* `puiss_max`
- *Masse minimale* `masse_ordma_min`
- *Consommation mixte* `conso_mixte`

➢ Ajout de la variable `conso_mixte` comme un hyperparamètre

➢ **Séparation des données** en set d'entraînement (70%) et de validation (30%)

➢ **Choix du modèle :** LinearRegression() de scikit-learn.

Variables catégorielles

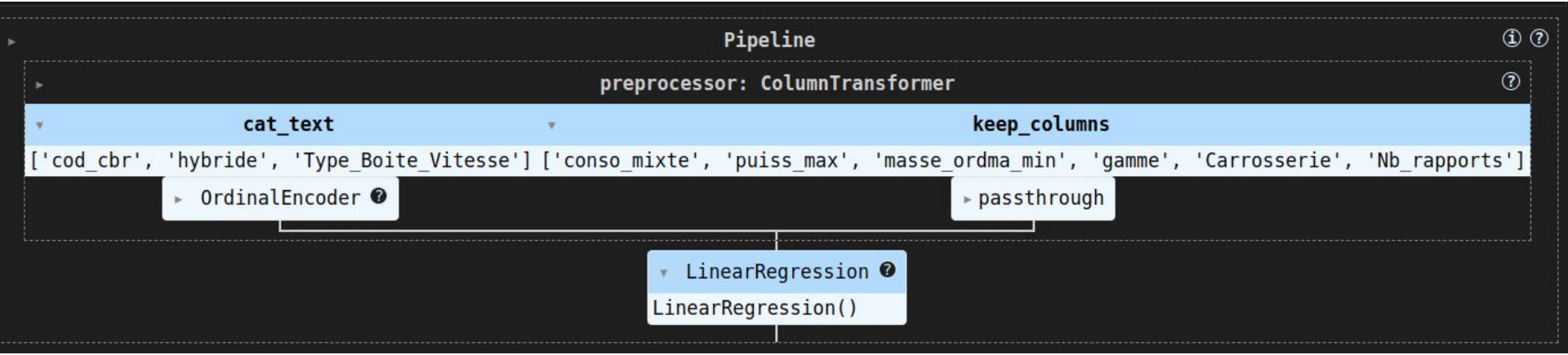
- **Traitement des variables catégorielles :**
  - *Type de carburant* `cod_cbr` : regroupement des catégories en 3 modalités principales : *"ESSENCE", "GAZOIL", "AUTRE"*
  - *Type de transmission et nombre de vitesses* `typ_boite_nb_rapp` : scindé en 2 variables distinctes :
    - `typ_boite_Vitesse` : ayant 3 modalités : *"MANUELLE", "AUTOMATIQUE", "AUTRE"*
    - `Nb_Rapport`
- **Valeur manquante :** Pas de valeur manquante au sein des variables catégorielles sélectionnées
- **Encodage :**
  - *Type de gamme* `gamme` *:* Encodage ordinal manuel selon l'ordre de montée en gamme
  - *Type de carrosserie* `Carrosserie` : Encodage ordinal manuel selon l'ordre croissant de masse médiane
  - *Type de carburant* `cod_cbr`
  - *hybridité* `hybride`
  - *Type de transmission* `typ_boite_Vitesse`
  - *Nombre de vitesses* `Nb_Rapport`

  } Encodage ordinal via ordinalEncoder

Variables numériques

- **Outliers :**
  - `puiss_max` : Imputations de valeurs plafonds :
    - `puiss_max`= 500 kW si `puiss_max` > 500 kW (11 observations)
    - `puiss_max`= 40 KW si `puiss_max` < 40 kW (1 observation)
  - `conso_mixte`: Imputations de valeurs plafonds :
    - `conso_mixte`= 20 l/100km si `conso_mixte`> 20 l/100km (2 observations)
    - `conso_mixte`= 3 l/100km si `conso_mixte` < 3 l/100km (4 observations)
  - `co2`: Calcul des émissions de CO2 en fonction de la `conso_mixte` et du carburant selon l'équation de combustion parfaite
- **Valeurs Manquantes :** Pas de valeur manquante au sein des variables quantitatives sélectionnées
- **Normalisation :** Il n'est pas requis de standardiser les variables numériques dans une même échelle avec l'algo **LinearRegression()** de scikit-Learn.

➢ **Pipeline de transformation :**



8 variables explicatives en entrée du modèle + 1 hyperparamètre (`conso_mixte`)

➢ Modèle 1 (avec `conso_mixte`)

Métrique	Jeu de train	Jeu de validation
MAE	1.34	1.36
RMSE	3.2	3.42
R2	0.9911	0.9896

➢ **Equation des émissions de CO2 :**

`co2` = - 28.39 + 23.69 * `conso_mixte` + 19.73 * `cod_cbr`
+ 0.0031 * `masse_ordma_min`
+ 0.77 * `Carrosserie`
+ 0.0 * `puiss_max` - 0.35 * `Nb_rapports`
- 0.44 * `gamme` - 0.74 * `hybride`
- 0.78 * `Type_Boite_Vitesse`

- **Très bonnes métriques en considérant la valeur médiane de la target réelle (205g/km)**
- **Le biais du modèle est très faible**
- **Pas de sur-apprentissage**
- **La target est principalement déterminée par 3 variables :** `conso_mixte` , `cod_cbr` et `masse_ordma_min`
- **L'apport des autres variables est à la marge**

➢ Modèle 2 (sans `conso_mixte`)

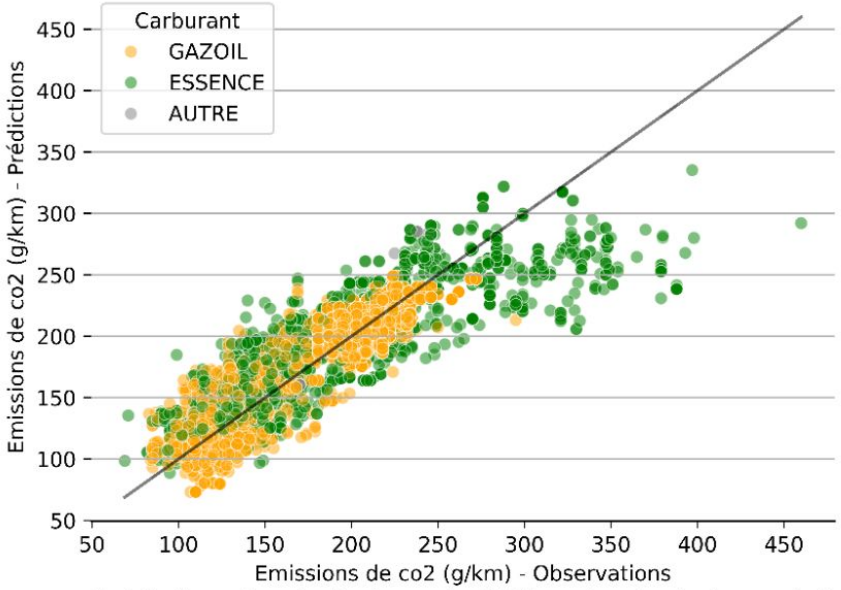
Métrique	Jeu de train	Jeu de validation
MAE	11.89	11.8
RMSE	16.05	16.04
R2	0.776	0.7716

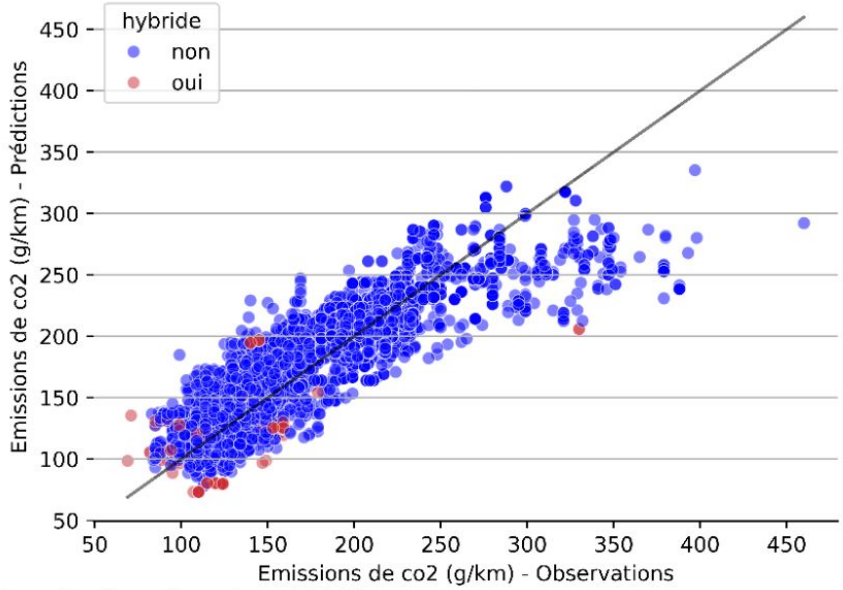
➢ Equation des émissions de CO2 :

`co2` = 99.89 + 0.039 * `masse_ordma_min` + 0.33 * `puiss_max`
+ 8.75 * `Carrosserie`
-23.89 * `cod_cbr` - 67.21 * `hybride` - 6.27 * `gamme`
-5.90 * `Type_Boite_Vitesse` - 5.38 * `Nb_rapports`

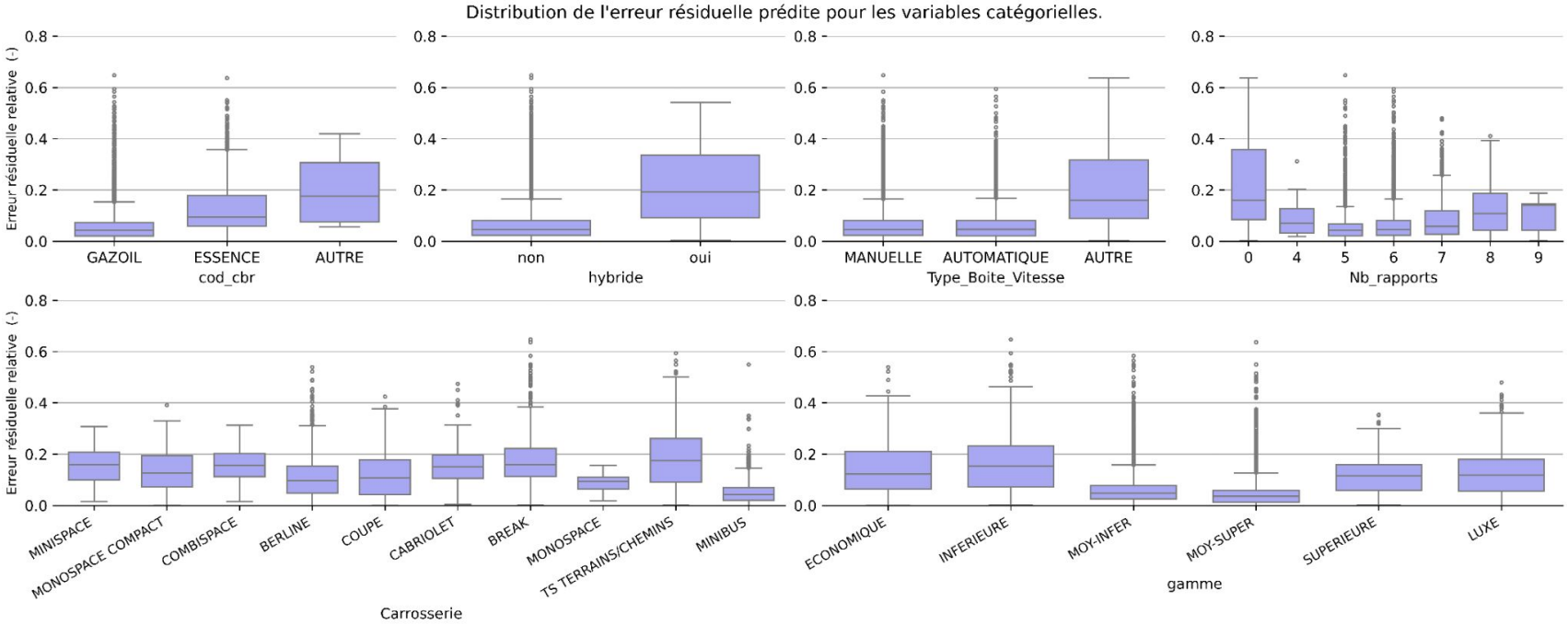
- **Les MAE et RMSE restent relativement correctes en considérant la valeur médiane des observations (205g/km)**
- **Modèle relativement bien ajusté aux données explicatives**
- **Pas de sur-apprentissage**
- **Redistribution des paramètres associés aux variables explicatives en supprimant la variables `conso_mixte` :**
  - **Leur poids sont tous à la hausse**
  - **Avec un apport significatif**
    - **en positif : des variables `masse_ordma_min` , `puiss_max` , `Carrosserie`**
    - **en négatif : des variables `cod_cbr` , `hybride`**

➢ Modèle 2 (sans `conso_mixte`)





- **Pour les observations où les émissions de CO2 < 250 g/km, le modèle surestime légèrement les émissions de CO2**
- **Pour les observations où les émissions de CO2 > 250 g/km, le modèle sous estime significativement les émissions de CO2**
- **Erreur résiduelle entre les prédictions et les observations plus importante pour les véhicules essence ainsi que les véhicules hybrides.**



- **Le modèle capture mieux les véhicules à moteur diesel et non hybride …**
- **… et plus généralement les catégories qui sont suffisamment assez représentées pour être apprises par le modèle.**

➢ Modèle 2 - Features polynomiales de second ordre :

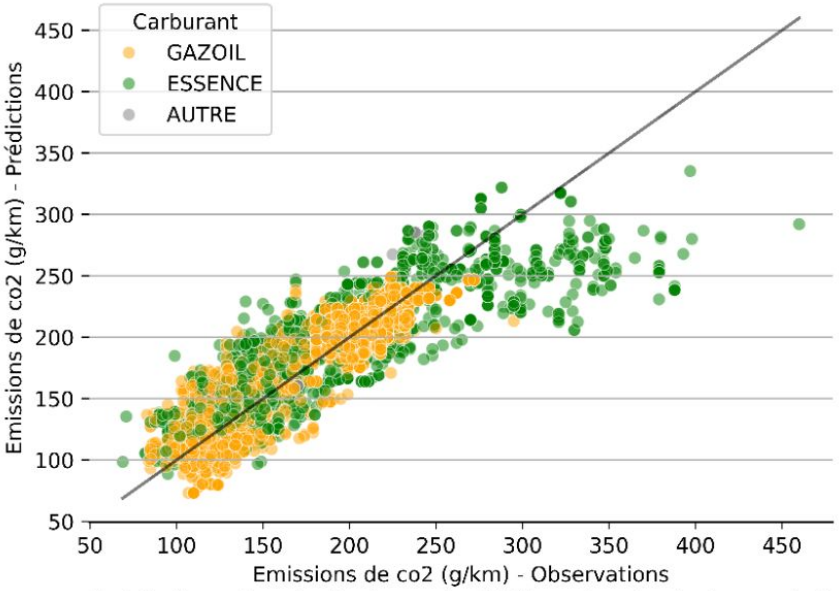
Métrique	Jeu de train	Jeu de validation	Jeu de train	Jeu de validation
MAE	11.89	11.8	9.26	9.17
RMSE	16.05	16.04	12.93	13.07
R2	0.776	0.7716	0.8538	0.8485

➢ Equation des émissions de CO2 :

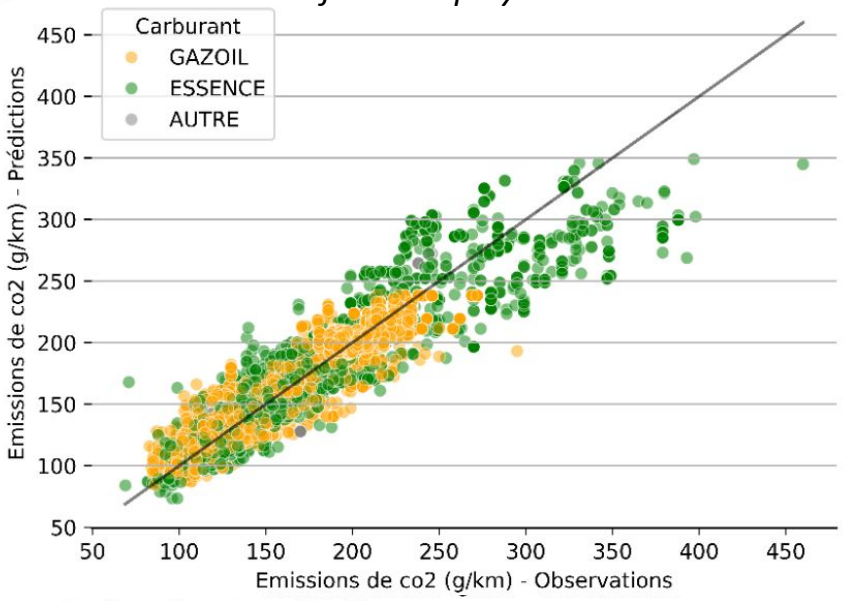
`co2` = -39.20 + 0.18 * `masse_ordma_min`
+ 0.71 * `puiss_max`
+54.63 * `cod_cbr` -76.40 * `hybride`
....
-0.35* `puiss_max` * `hybride`
-0.02* `masse_ordma_min` * `hybride`
-76.40 * `hybride` ^2
-156.20* `Type_Boite_Vitesse` * `hybride`

- **Les MAE, RMSE et coefficient de détermination sont nettement améliorés**
- **Pas de sur-apprentissage**
- **Contribution significative**
  - **des features simples :** `masse_ordma_min` , `puiss_max` , `cod_cbr` , `hybride`
  - **des combinaisons polynomiales impliquant la variable** `hybride` **(en négatif)**

➢ Modèle 2 - Features polynomiales de second ordre :

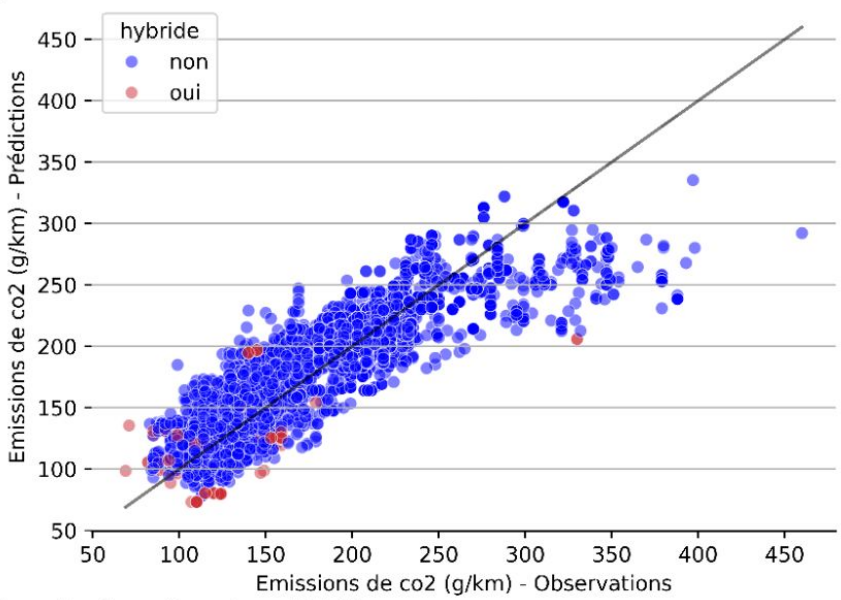


avec features polynomiales

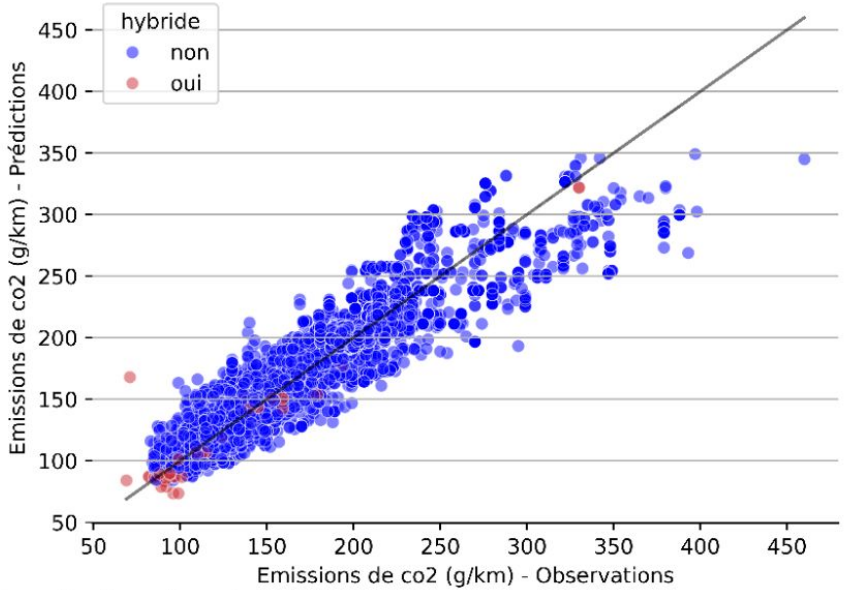


- **Corrections des surestimations des émissions de CO2 pour les observations dont la target réelle est < à 250 g/km**
- **Corrections sous-estimations des émissions de CO2 pour les observations sont la target réelle est > à 250 g/km**
- **Meilleures prédictions pour les véhicules hybrides.**

➢ Modèle 2 - Features polynomiales de second ordre :



avec features polynomiales



- **Corrections des surestimations des émissions de CO2 pour les observations dont la target réelle est < à 250 g/km**
- **Corrections sous-estimations des émissions de CO2 pour les observations sont la target réelle est > à 250 g/km**
- **Meilleures prédictions pour les véhicules hybrides.**

➢ Modèle 1 (avec `conso_mixte`)

Métrique	Jeu de train	Jeu de validation	Jeu de test
MAE	1.34	1.36	1.32
RMSE	3.2	3.42	2.81
R2	0.9911	0.9896	0.9932

➢ Modèle 2 - Features polynomiales de second ordre

Métrique	Jeu de train	Jeu de validation	Jeu de test
MAE	9.26	9.17	9.32
RMSE	12.93	13.07	13.19
R2	0.8538	0.8485	0.8517

➢ Les 2 modèles possèdent une bonne capacité de généralisation aux données test avec des métriques très similaires à celles du test d'entraînement et de validation

Conclusion

L'analyse exploratoire de la base de données provenant de l'ADEME a révélé de **forts déséquilibres au sein des classes des différentes variables catégorielles :**

- 90.0% des véhicules enregistrés en base fonctionnent au gazoil en régime moteur, contre 9.9 % pour essence.
- Plus de 99% de nos observations sont constituées de véhicules non hybrides
- L'essentiel des véhicules sont des minibus (84%).

Selon les analyses multivariées :

- Les émissions de CO2 sont très fortement corrélées à la consommation de carburant en conduite mixte (avec un coefficient de 0.97), à la masse, au type de carrosserie, et plus faiblement à la puissance maximale (coefficient de corrélation de 0.35).

Création d'un **modèle prédictif de régression linéaire** basé sur **8 variables explicatives + 1** (consommation mixte - hyperparamètre) :

- En incluant la consommation mixte :
  - Excellentes prédictions d'émission de CO2 caractérisées par une MAE de 1.3 g/km, une RMSE 3.2 g/km sur le set d'entraînement
  - Très bonne généralisation aux données de test avec une MAE de 1.3 g/km, une RMSE de 2.8 g/km et un R2 de 0.99.
- En excluant la consommation mixte :
  - Relativement bonnes prédictions améliorées par l'ajout de feature polynomiales d'ordre 2, les MAE et RMSE sont de 9 et 13 g/km
  - Bonne généralisation aux données de test avec une MAE de 9.3 g/km, une RMSE de 13.2 g/km et un R2 de 0.85.