

## Annexe 3

Fret et émissions de CO<sub>2</sub> en France. Etat des lieux

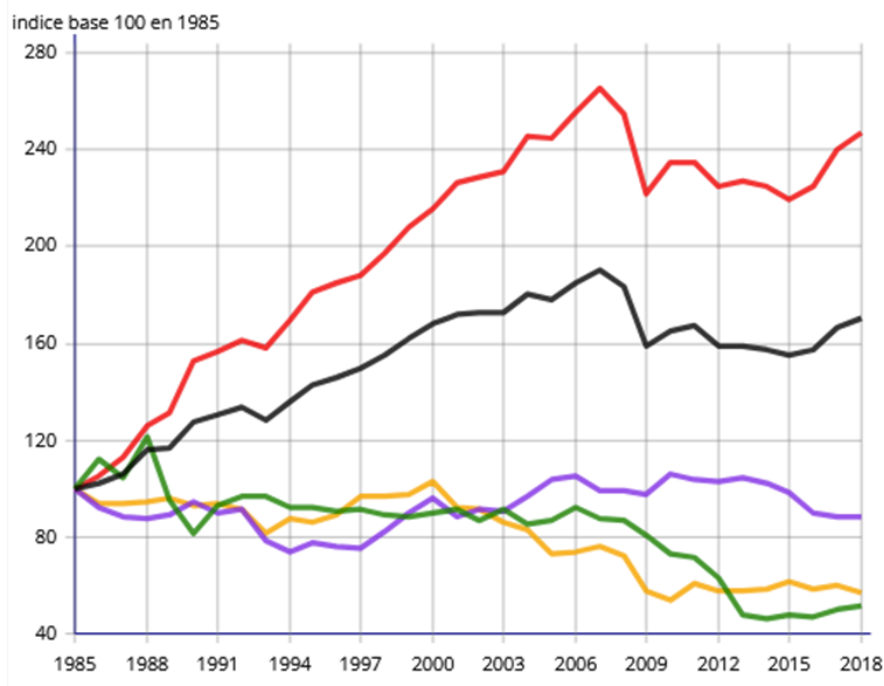


Figure 15 : Évolution du transport intérieur de marchandises par mode de 1985 à 2018<sup>1</sup>.

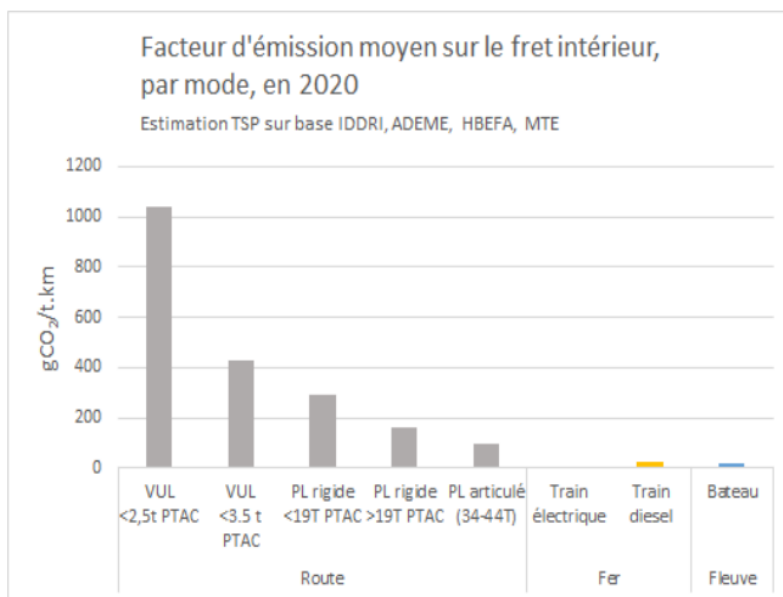


Figure 16 : Données sur les différents moyens de transport de marchandises. VUL : véhicule utilitaire léger, consommation énergétique, émissions CO<sub>2</sub>.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> [Tableaux de l'économie française](#), Édition 2020, source SDES cité dans INSEE

<sup>2</sup> « [Assurer le fret dans un monde fini](#) », The Shift Project, 2022

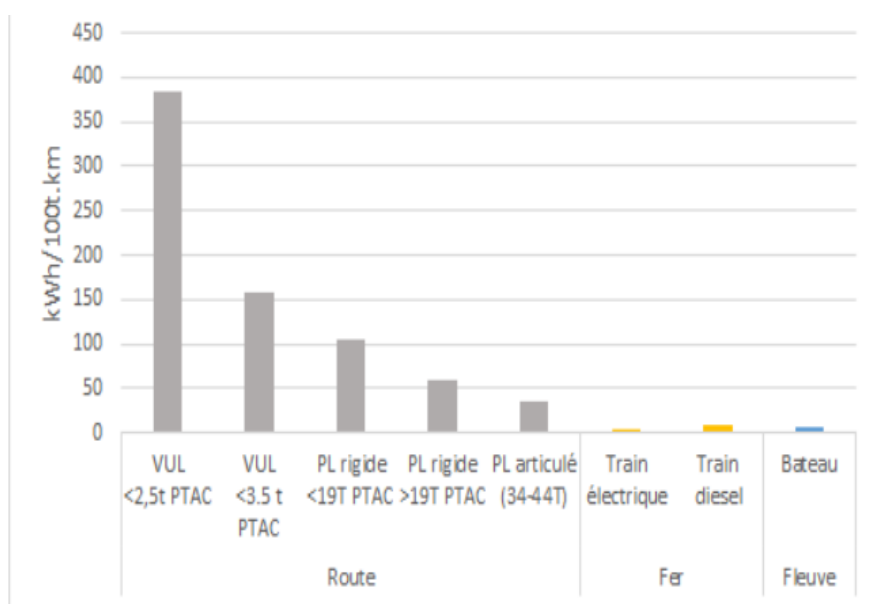


Figure 17 : Données sur les différents moyens de transport de marchandises. VUL : véhicule utilitaire léger, PL : poids lourd émissions CO<sub>2</sub>.<sup>2</sup>

## L'équation de Kaya appliquée aux transports.

Les Figures 17-21 ainsi que les textes associés sont issues de la thèse d'Aurélien Bigo<sup>3</sup>. Les textes ont parfois été légèrement modifiés pour être adaptés au contexte de ces TDs.

L'identité mathématique utilisée pour décomposer les différents leviers s'écrit comme la somme des émissions des  $i$  modes considérés, chaque mode étant décomposé en un produit de fractions qui se simplifient, mais font apparaître différents termes d'intérêt. Ce genre de décomposition s'inspire de la fameuse « équation de Kaya<sup>4</sup> ».

$$\text{CO}_{2,\text{Transport}} = \sum_i D \cdot \frac{D_i}{D} \cdot \frac{C_i}{D_i} \cdot \frac{E_i}{C_i} \cdot \frac{\text{CO}_{2,i}}{E_i}$$

avec :

$D$  : la demande de transport voyageurs ou marchandises (voy.km ou t.km, soit le nombre de kilomètres parcourus par les voyageurs et par les tonnes de marchandises transportées. 1 t.km = 1 tonne de marchandises qui parcourt 1 km)

- $D_i$  : demande de transport du mode  $i$  (voy.km ou t.km)
- $C_i$  : circulation des véhicules du mode  $i$  (en veh.km : véhicule.kilomètre)
- $E_i$  : énergie consommée par le mode  $i$  (en tep : tonne équivalent pétrole)
- $\text{CO}_{2,i}$  : émissions de CO<sub>2</sub> du mode  $i$  (en tCO<sub>2</sub>)

<sup>3</sup> « Les transports face au défi de la transition énergétique », Thèse A. Bigo, 2020

<sup>4</sup> L'équation de Kaya est une équation utilisée par les économistes, car le PIB intervient dedans. Elle s'écrit :  $\text{CO}_2 = \text{population} \times (\text{PIB}/\text{population}) \times (\text{énergie}/\text{PIB}) \times (\text{CO}_2/\text{énergie})$ . Le premier terme est la démographie, le deuxième la richesse par habitant, le troisième l'intensité énergétique de l'économie (l'énergie nécessaire pour produire de la richesse), et le quatrième l'intensité carbone de l'énergie.



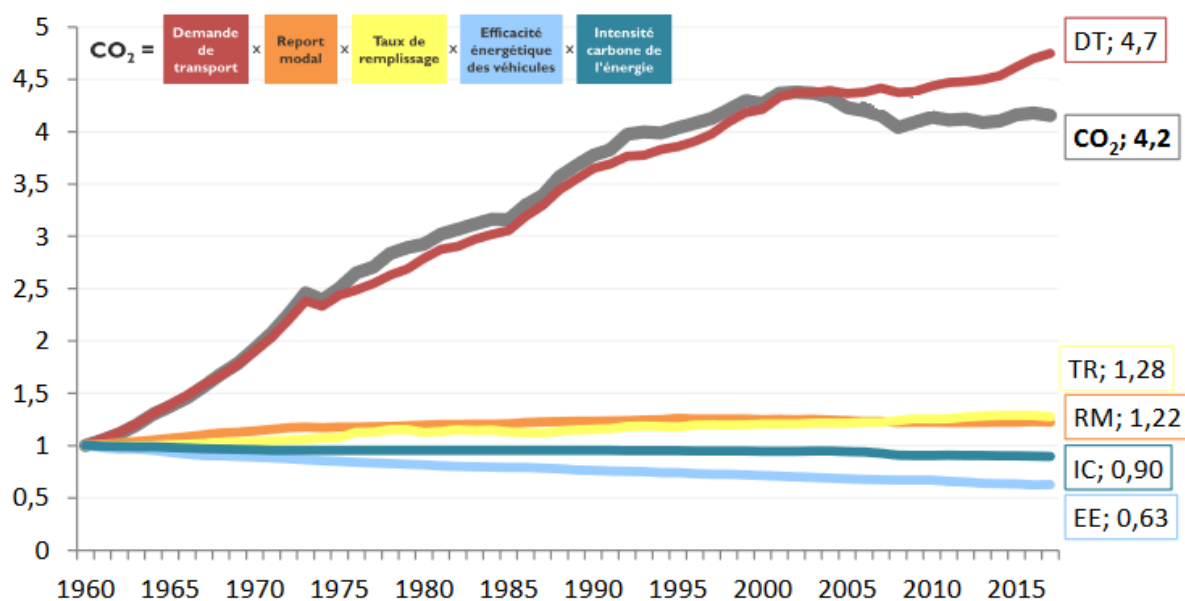
[Utilisé avec l'autorisation de Aurélien Bigo]<sup>3</sup>

Figure 18 : Représentation visuelle de l'identité mathématique détaillée dans le texte. A noter que c'est l'inverse du taux de remplissage qui est proportionnelle aux émissions de  $CO_2$ , et que c'est également plutôt la consommation énergétique des véhicules plutôt que « l'efficacité énergétique » qui est proportionnelle aux émissions. Mais on voit l'idée...<sup>3</sup>

Les 5 facteurs qui apparaissent dans l'identité sont les suivants :

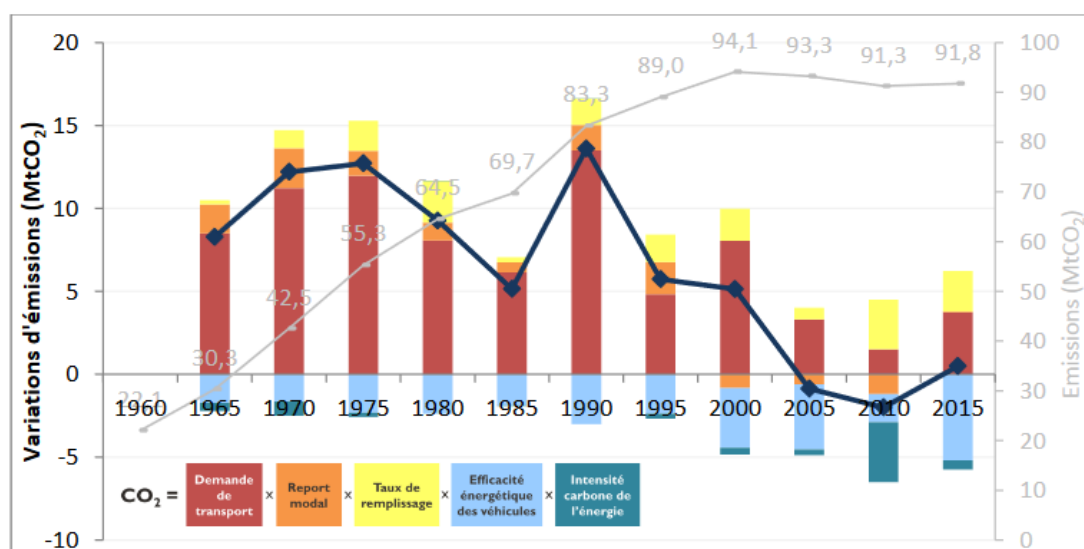
1. La demande de transport (notée DT dans la suite de l'étude),  $D$  dans l'identité ;
2. Le report modal (RM), qui correspond à un effet structure lié à la répartition de la demande entre les modes ; pour chaque mode, le ratio  $D_i / D$  représente sa part modale ou le pourcentage des kilomètres totaux réalisés avec le mode  $i$  ; le facteur de report modal permet par exemple de mesurer l'impact sur les émissions d'un transfert de 1% des voy.km ou des t.km depuis le ferroviaire vers le routier ; l'impact est alors égal au surplus d'émissions du transport routier induit par ce pourcent de trafic ajouté, moins les émissions évitées dans le ferroviaire dues à cette perte de trafic ;
3. Le taux de remplissage des véhicules (TR), qui se mesure en nombre de voyageurs ou de tonnes par véhicule (voy/veh ou t/veh) ; dans l'identité c'est  $C_i / D_i$  qui apparaît, soit l'inverse du taux de remplissage, l'unité est donc en veh/voy ou veh/t ; ainsi, lorsque le taux de remplissage baisse, les émissions augmentent (car l'inverse du TR  $C_i / D_i$  est en hausse) (...);
4. L'efficacité énergétique des véhicules (EE), mesurée par  $E_i / C_i$  qui correspond aux consommations d'énergie d'un véhicule qui parcourt un kilomètre, en tep/veh.km ;
5. L'intensité carbone de l'énergie (IC), dont le rapport  $CO_{2,i} / E_i$  correspond à la quantité d'émissions de  $CO_2$  par unité d'énergie consommée du mode  $i$ , en  $tCO_2/tep$ .

## Application aux données historiques des émissions du transport de voyageurs



[Utilisé avec l'autorisation de Aurélien Bigo]<sup>3</sup>

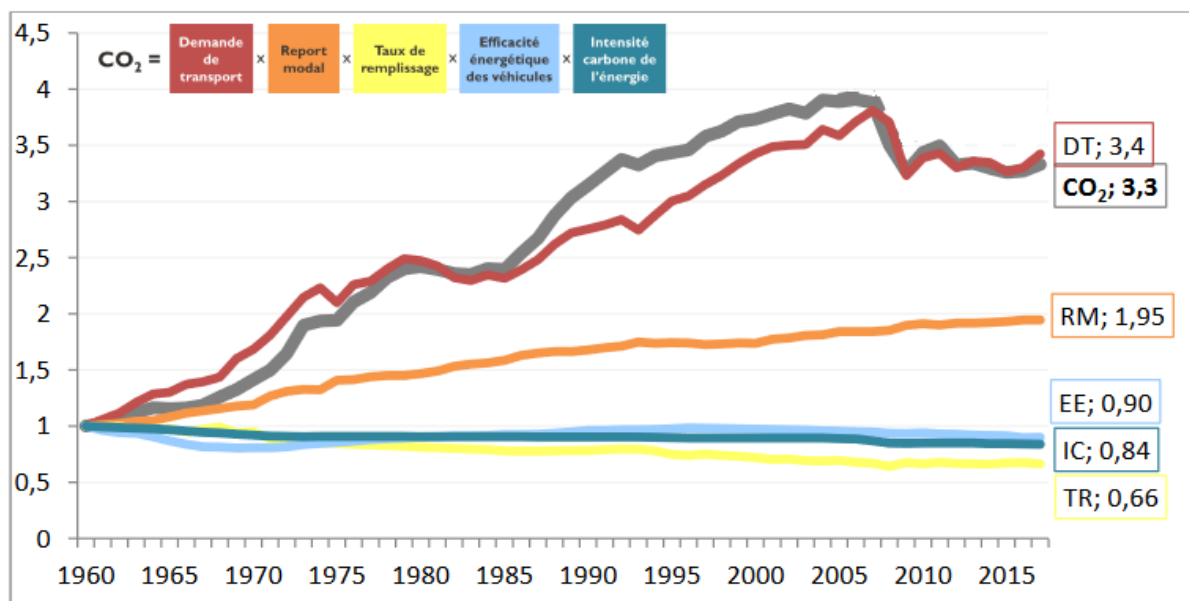
Figure 19 : Décomposition multiplicative de l'évolution des émissions de CO<sub>2</sub> du transport de voyageurs, 1960-2017<sup>3</sup>



[Utilisé avec l'autorisation de Aurélien Bigo]<sup>3</sup>

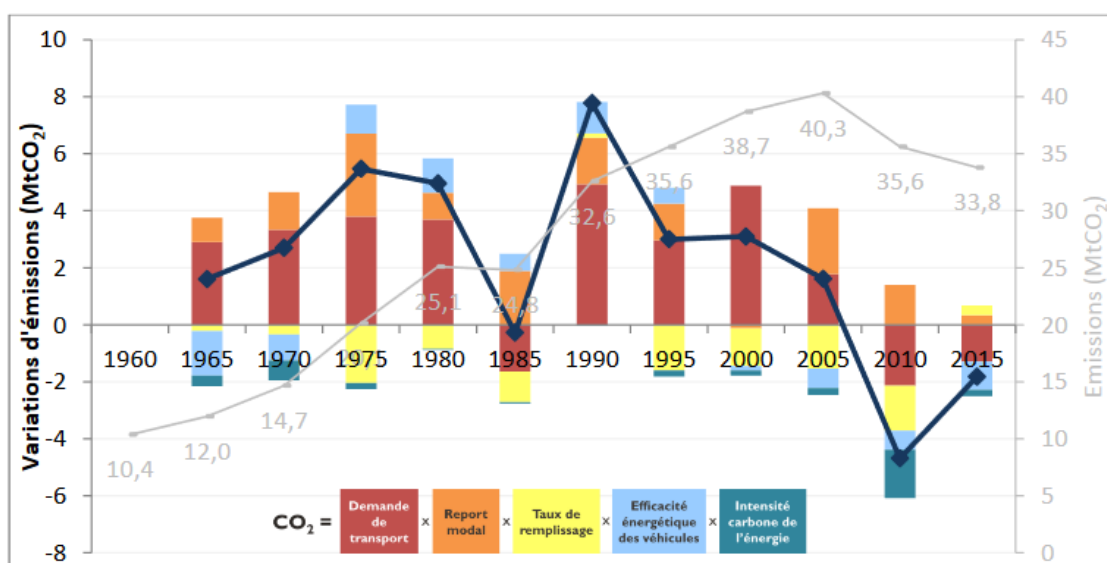
Figure 20 : Variation des émissions de CO<sub>2</sub> du transport de voyageurs, 1960-2017<sup>3</sup>. Cette figure correspond en fait à la dérivée des fonctions de la figure précédente, et permet de mieux illustrer les variations. La courbe grise représente l'évolution des émissions avec un pas de temps de 5 ans, la courbe de points bleus marine représente le différentiel entre 2 dates (par exemple 1965 représente les +8,2 MtCO<sub>2</sub> entre 1960 et 1965), expliqué par les 5 facteurs qui jouent à la hausse ou à la baisse sur les émissions.<sup>3</sup>

## Application aux données historiques des émissions du transport de fret



[Utilisé avec l'autorisation de Aurélien Bigo]<sup>3</sup>

Figure 21 : Décomposition multiplicative de l'évolution des émissions de CO<sub>2</sub> du transport de marchandises, 1960-2017<sup>3</sup>. La courbe grise représente l'évolution des émissions avec un pas de temps de 5 ans, la courbe de points bleus marine représente le différentiel entre 2 dates (par exemple 1965 représente les +8,2 MtCO<sub>2</sub> entre 1960 et 1965), expliqué par les 5 facteurs qui jouent à la hausse ou à la baisse sur les émissions. <sup>3</sup>



[Utilisé avec l'autorisation de Aurélien Bigo]<sup>3</sup>

Figure 22 : Variation des émissions de CO<sub>2</sub> du transport de marchandises, 1960-2017<sup>3</sup>. Cette figure correspond en fait à la dérivée des fonctions de la figure précédente, et permet de mieux illustrer les variations. La courbe grise représente l'évolution des émissions avec un pas de temps de 5 ans, la courbe de points bleus marine représente le différentiel entre 2 dates (par exemple 1965 représente les +1,5 MtCO<sub>2</sub> entre 1960 et 1965), expliqué par les 5 facteurs qui jouent à la hausse ou à la baisse sur les émissions. <sup>3</sup>

## Projection selon les 4 scénarios de l'ADEME

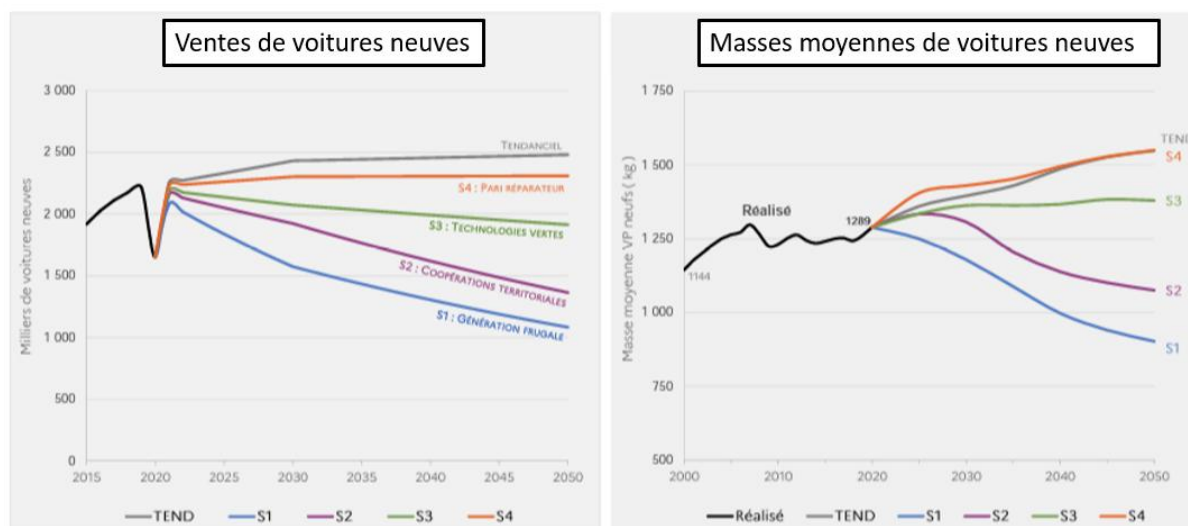
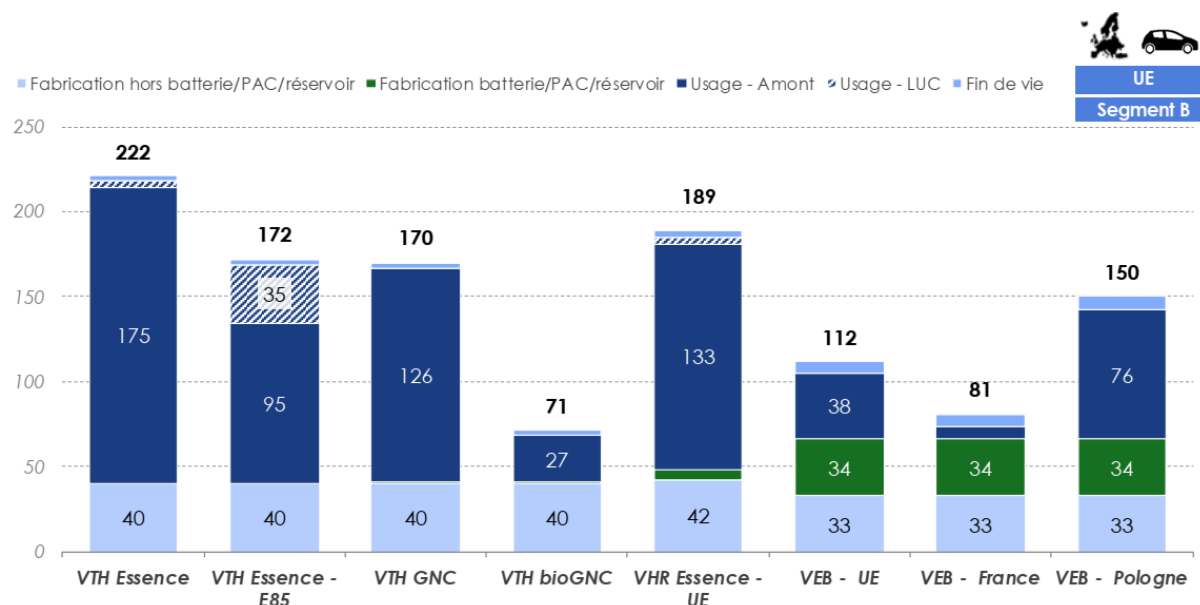


Figure 23 : Projections de l'ADEME selon les 4 scénarios possibles. Le scénario « Tendanciel » poursuit les trajectoires et tendances actuelles. Les scénarios S1 à S4 vont progressivement d'une vision d'un futur frugal (S1 : « génération frugale ») ou au contraire misant sur des technologies sans remettre en question les modes de vie (S4 : « pari réparateur »).<sup>5</sup>

## Données sur d'autres modes de propulsion

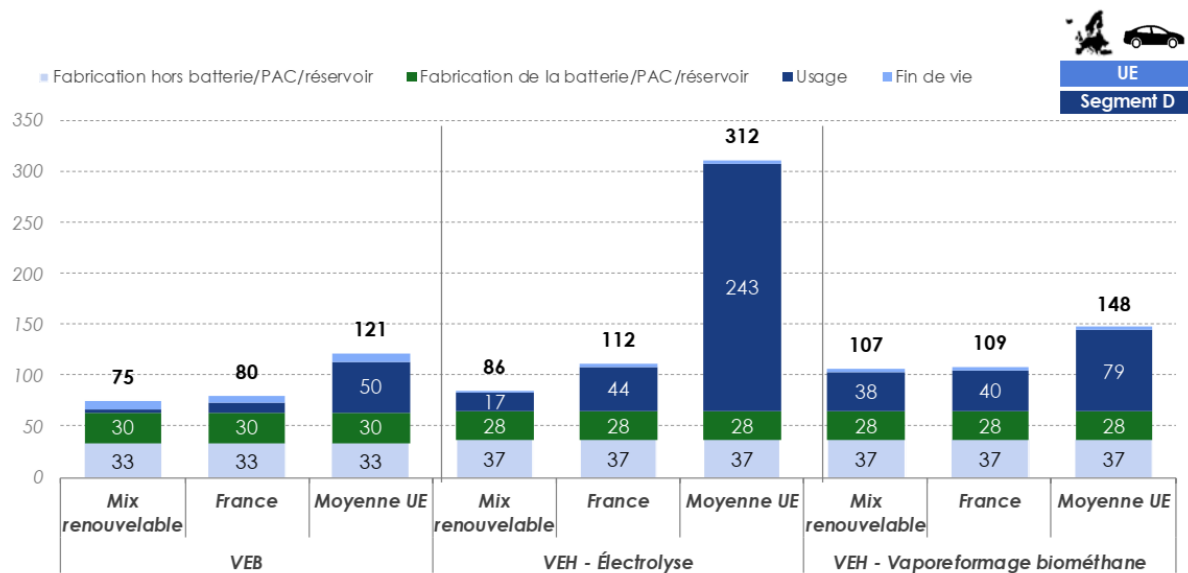


[Utilisé avec l'autorisation de Carbone 4]<sup>6</sup>

Figure 24 : Emissions (en gCO<sub>2</sub>e/km) de différents types de voitures citadines et sources d'énergie. VTH : voiture thermique ; GNC : gaz naturel comprimé ; bioGNC : bio-méthane comprimé ; VHR : véhicule hybride rechargeable ; VEB : véhicule électrique de type B. Pour ce dernier, différents mix électriques sont étudiés : UE, France et Pologne (Carbone 4<sup>6</sup>, 2020).

<sup>5</sup> « Transition(s) 2050. Choisir maintenant- agir pour le climat », ADEME (2021)

<sup>6</sup> « Transport routier : quelles motorisations alternatives pour le climat ? », Carbone 4, novembre 2020.



[Utilisé avec l'autorisation de Carbone 4]<sup>6</sup>

Figure 25 : Emissions (en gCO<sub>2</sub>e/km) de différents types de voitures berlines roulant avec de l'hydrogène produit par deux procédés différents, et comparaison avec un véhicule électrique classique. VEH : véhicule électrique à hydrogène (pile à combustible). « Electrolyse » : l'hydrogène est produit par électrolyse de l'eau. « vaporéformage du biométhane » : l'hydrogène est produit par une réaction chimique à haute température à partir de biométhane. « Mix renouvelable » : l'électricité provient d'un mix électrique très bas-carbone (Carbone 4<sup>6</sup>, 2020).