

# Etude des émissions de Gaz à Effet de Serre des véhicules Superéthanol-E85 en Analyse de Cycle de Vie



Sandra Beauchet, Xavier Guichet, Olivier Guyon, Joris Melgar, Amélie Pinard, Cyprien Ternel  
IFPEN  
01/09/2022

## Direction Economie et Veille

<b>Etude</b>	VRD14	<b>N° chrono direction</b>	R14-2022.155
<b>Partenaires</b>	SNPAA ; AIBS ; Intercéréales	<b>N° contrat</b>	SNPAA_CT_21.01.V3

<b>Titre</b>	<b>Etude des émissions de Gaz à Effet de Serre des véhicules Superéthanol-E85 en Analyse de Cycle de Vie</b>		
<b>Rédacteur(s) et appartenance</b>	Sandra Beauchet, Xavier Guichet, Olivier Guyon, Joris Melgar, Amélie Pinard, Cyprien Ternel		
<b>Diffusion</b>	Confidentiel	<b>Date de diffusion</b>	01/09/2022
<b>Validation direction</b> <i>Validation scientifique</i>	François Kalaydjian	<b>Validation projet</b> <i>Conformité aux besoins</i>	Cyprien Ternel

<b>Mots-clés</b>	Bioéthanol, Analyse du Cycle de Vie, Emissions de Gaz à Effet de Serre, Transport
------------------	---

### Résumé

L'analyse du cycle de vie propose une méthodologie normée (ISO 14040 et 14044) qui fait consensus dès qu'il s'agit de déterminer les impacts environnementaux d'un produit ou d'un service. Une fois appliquée au véhicule léger, équipé de différentes technologies de groupe motopropulseur, l'ACV permet de réaliser des bilans (ici exclusivement GES) complets dits « du berceau à la tombe ». Par ce moyen, les émissions indirectes (i.e hors pot d'échappement) sont aussi comptabilisées dans les bilans, tout comme la captation du CO<sub>2</sub> lors de la croissance des plantes (on parle ici de CO<sub>2</sub> biogénique).

IFPEN a réalisé pour le compte du SNPAA, de l'AIBS et d'Intercéréales une ACV de plusieurs véhicules de segment C : un véhicule thermique roulant au Superéthanol-E85 ou à l'essence fossile, un full-hybrid E85, un PHEV E85 en usage réel (40% électrique/60% E85), un PHEV E85 en usage homologation (70% électrique/ 30% E85), ainsi que deux véhicules électriques (1 avec une batterie de 60 kWh et 1 avec une batterie de 80 kWh). L'étude a aussi apporté une vision prospective, avec des horizons temporels 2030 et 2040.

À la suite des résultats de cette étude, plusieurs éléments de conclusion ou enseignements sont à souligner :

- En ce qui concerne le véhicule léger en France, l'utilisation d'un moteur hybride rechargeable alimenté exclusivement au Superéthanol-E85 est, en termes d'émissions de GES, au moins aussi performant que le véhicule électrique à batterie. Ceci est vrai pour une utilisation en usage réel de l'hybride rechargeable, c'est-à-dire 40% des kilomètres en mode tout électrique, et 60% en mode thermique.
- Sur un périmètre européen, avec un mix électrique plus carboné, l'hybride rechargeable E85 fait même mieux que le véhicule électrique à batterie.
- Il est à noter que l'hybridation simple (i.e sans possibilité de recharge sur le réseau, mais recharge uniquement lors des freinages) couplée au Superéthanol-E85 apporte déjà des gains très intéressants par rapport à une motorisation thermique 100% essence fossile.
- Si on considère un horizon de temps plus lointain, comme 2030 ou 2040, les technologies et le process de fabrication des vecteurs énergétiques vont au global tous évoluer. Mais la solution hybride rechargeable E85 restera très intéressante d'un point de vue GES, sous réserve de maintenir les efforts sur la baisse des émissions de CO<sub>2</sub> liées à la production de bioéthanol.

## Executive Summary

Life cycle assessment offers a standardized methodology (ISO 14040 and 14044) that is widely used to determine the environmental impact of a product or service. When applied to a light vehicle equipped with different powertrain technologies, LCA makes it possible to carry out complete "cradle-to-grave" assessments (in this case exclusively GHG). In this way, indirect emissions (i.e. excluding the exhaust pipe emissions) are also taken into account in the balances, as is the capture of CO<sub>2</sub> during the growth of plants (biogenic CO<sub>2</sub>).

IFPEN carried out an LCA of several C-segment vehicles on behalf of the SNPAA, AIBS and Intercéréales: an internal combustion vehicle running on Superethanol-E85 or fossil fuel, a full-hybrid E85, a PHEV E85 in real use (40% electric/60% E85), a PHEV E85 in homologation use (70% electric/30% E85), as well as two electric vehicles (1 with a 60 kWh battery and 1 with an 80 kWh battery). The study also provided a prospective vision, with time horizons of 2030 and 2040.

Following the results of this study, several conclusions can be drawn:

- As far as the light vehicle in France is concerned, the use of a plug-in hybrid engine fueled exclusively with Superethanol-E85 is, in terms of GHG emissions, at least as efficient as the battery electric vehicle. This is true for real use of the plug-in hybrid, i.e. 40% of the kilometers in all-electric mode and 60% in combustion mode.

- On a European basis, with a more carbon-intensive electricity mix, the E85 plug-in hybrid does even better than the battery electric vehicle.

- It should be noted that simple hybridization (i.e. without the possibility of recharging on the grid but recharging only when braking) coupled with Superethanol-E85 already brings very interesting gains compared to a 100% fossil fuel engine.

- If we look further ahead, to 2030 or 2040, the technologies and manufacturing processes for energy carriers will all evolve. But the E85 plug-in hybrid solution will remain very interesting from a GHG point of view, provided that efforts to reduce CO<sub>2</sub> emissions from bioethanol production are maintained.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>4</b>
<b>1.1</b>	<b>CONTEXTE .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2</b>	<b>OBJECTIFS .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>SIMULATION DES CONSOMMATIONS DES VEHICULES .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>METHODOLOGIE DE LA SIMULATION SYSTEME .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2.</b>	<b>CAS D'ETUDE ET HYPOTHESES ASSOCIEES .....</b>	<b>5</b>
2.2.1.	DEFINITION ET DIMENSIONNEMENT DES VEHICULES .....	5
2.2.2.	HYPOTHESES LIEES A L'INTRODUCTION D'ETHANOL DANS LE CARBURANT .....	6
2.2.3.	PROJECTIONS AUX HORIZONS 2030 ET 2040 .....	7
2.2.4.	CYCLES DE CONDUITE .....	8
2.2.5.	MODES DE SIMULATION POUR LES VEHICULES HYBRIDES .....	8
2.2.6.	RESUME DES CAS D'ETUDE .....	9
<b>2.3.</b>	<b>RESULTATS .....</b>	<b>9</b>
<b>2.4.</b>	<b>CONCLUSIONS ET LIMITES DE L'ETUDE .....</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>ANALYSE DU CYCLE DE VIE.....</b>	<b>12</b>
<b>3.1</b>	<b>OBJECTIF ET CHAMP DE L'ETUDE.....</b>	<b>12</b>
3.1.1	FRONTIERES DU SYSTEME .....	12
3.1.2	UNITE FONCTIONNELLE.....	13
3.1.3	SCENARIOS ETUDIES .....	13
<b>3.2</b>	<b>INVENTAIRES DU CYCLE DE VIE .....</b>	<b>14</b>
3.2.1	LES VEHICULES ETUDIES ET VECTEURS ENERGETIQUES.....	14
3.2.2	FIN DE VIE .....	19
<b>3.3</b>	<b>RESULTATS EVALUATION DES IMPACTS POTENTIELS SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE .....</b>	<b>20</b>
3.3.1	HORIZON TEMPOREL 2022 .....	21
3.3.2	HORIZON TEMPOREL 2030 .....	25
3.3.3	HORIZON TEMPOREL 2040 .....	27
<b>4</b>	<b>PROJECTION DE LA CONSOMMATION D'ETHANOL DANS LE PARC FRANÇAIS .....</b>	<b>30</b>
<b>4.1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>30</b>
<b>4.2</b>	<b>PRESENTATION DES HYPOTHESES GENERALES RETENUES POUR LES MODELISATIONS .....</b>	<b>31</b>
4.2.1	PRESENTATION DES SCENARIOS .....	31
4.2.2	LES SCENARIOS CONTEXTUELS .....	31
4.2.3	LES SCENARIOS DE POLITIQUE PUBLIQUE .....	32
4.2.4	ARBRES DES SCENARIOS.....	33
<b>4.3</b>	<b>HYPOTHESES SPECIFIQUES A L'ETUDE DE LA DEMANDE D'ETHANOL.....</b>	<b>33</b>
<b>4.4</b>	<b>RESUME DES HYPOTHESES RETENUES.....</b>	<b>34</b>
<b>4.5</b>	<b>RESULTATS .....</b>	<b>34</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>38</b>
	<b>ANNEXE A - ANNEXE .....</b>	<b>39</b>
<b>1.</b>	<b>TABLE DES FIGURES.....</b>	<b>39</b>
	<b>ANNEXE B -.....</b>	<b>40</b>

## 1 Introduction

### 1.1 Contexte

Historiquement, il existe un lien étroit entre le transport et le pétrole : 93 % de l'énergie utilisée provient de produits pétroliers. C'est ce lien qui est remis en question dans les scénarios de transition énergétique puisqu'au niveau mondial, le secteur du transport est le deuxième contributeur aux émissions anthropiques de Gaz à Effet de Serre (GES), après celui de la production d'électricité. Toutefois, des efforts ont été déployés pour réduire la dépendance du secteur du transport au pétrole en proposant des solutions énergétiques alternatives innovantes. Pour un constructeur commercialisant des véhicules légers en Europe, la réglementation en vigueur impose un plafond d'émission de CO<sub>2</sub> sur l'ensemble de sa flotte, fixé à 95 g CO<sub>2</sub> eq. /km, avec à la clef des pénalités si le constructeur ne respecte pas ce quota. Le Règlement sur les émissions de CO<sub>2</sub> des véhicules légers est en cours de discussion dans le cadre du paquet « Fit For 55 ». Le Parlement européen a voté le 8 juin 2022 pour réduire ce plafond à zéro en 2035, soit la fin des moteurs thermiques. En revanche, le Conseil européen a inclus le 29 juin une clause de revoyure où la Commission européenne devra prendre en compte les autres technologies pourvu qu'elles soient aussi bonnes que les voitures électriques en analyse de cycle de vie. Une phase de trilogue va commencer entre la Commission européenne, le Parlement européen et le Conseil européen.

Dans ce contexte réglementaire sévère, l'amélioration seule du rendement des moteurs thermiques ne sera pas suffisante et incite fortement les constructeurs à avoir recours à d'autres technologies bas-carbone comme :

- l'électrification, sous réserve que l'électricité soit faiblement carbonée
- l'incorporation de biocarburants ou de carburants synthétiques à la pompe
- les technologies piles à combustibles

Produit à partir de biomasse (betterave à sucre, blé...), le bioéthanol, utilisé ici avec de l'essence fossile en tant que carburant (E85) constitue une source d'énergie renouvelable et durable. La filière française du bioéthanol est actuellement en plein essor. Les performances du bioéthanol en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre ont déjà été établies dans le cadre d'études utilisant l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), et sont souvent mises en avant pour témoigner de l'intérêt de cette filière. Néanmoins, il manque à ce jour une étude ACV plus complète intégrant le cycle de vie des véhicules, pour évaluer l'intérêt de rouler au Superéthanol-E85. De même, l'association de ce carburant avec une motorisation hybride pourrait être très vertueuse.

### 1.2 Objectifs

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'intérêt d'utiliser l'E85 sur un véhicule léger de segment C, à différents horizons temporels (2022, 2030 et 2040), en prenant en compte à la fois le cycle de vie du véhicule et le cycle de vie du carburant. L'étude se concentre sur le seul indicateur de réchauffement climatique via les émissions de gaz à effet de serre (GES).

L'ACV du véhicule couplé aux technologies de propulsion (moteur thermique, hybride, électrique) et à leurs vecteurs énergétiques associés : carburants fossiles, E85 et mix électrique, a permis de comparer entre eux les options technologiques envisagées, et d'identifier celles les plus adaptées aux différents contextes d'un point de vue environnemental centré sur le changement climatique.

## 2 Simulation des consommations des véhicules

### 2.1 Méthodologie de la simulation système

Afin d'alimenter en données d'entrée les modèles de l'Analyse du Cycle de Vie, il est nécessaire d'estimer les valeurs de consommation énergétique des différents véhicules. Pour cela, la simulation système est utilisée. Elle permet d'obtenir les **consommations énergétiques sur cycles** en maîtrisant l'ensemble des modélisations et paramètres et ainsi d'extrapoler ces consommations pour des véhicules dont les données expérimentales sont inexistantes (notamment pour la projection de consommations énergétiques pour des horizons futurs). Au sein d'IFPEN, cette activité repose sur l'utilisation du logiciel *Simcenter Amesim™* et de composants de la librairie *IFP-Drive* co-développés par IFP Energies nouvelles et Siemens PLM Software. Ces modèles retranscrivent la physique de l'ensemble des composants des groupes motopropulseurs présents dans les véhicules conventionnels (moteur thermique, transmission, etc) et électrifiés (batterie, pile à combustible, machine électrique, électronique de puissance, etc). Ces modèles véhicules ont été validés au cours de plusieurs années de développement en s'appuyant sur les moyens expérimentaux d'IFP Energies nouvelles - à savoir des bancs moteurs thermiques, machines électriques et batteries ainsi que des bancs à rouleaux sur lesquels sont instrumentés les véhicules. Ces moyens permettent également de fournir des données fidèles aux choix technologiques des constructeurs automobiles, notamment en ce qui concerne les cartographies de consommation des véhicules.

### 2.2. Cas d'étude et hypothèses associées

#### 2.2.1. Définition et dimensionnement des véhicules

Le projet s'intéresse à l'introduction de Superéthanol-E85 dans des véhicules thermiques et hybrides conventionnels. De plus, les performances de ces véhicules sont comparées à celles de véhicules électriques équivalents. Ainsi les véhicules étudiés sont les suivants :

- |   |                |
|---|----------------|
| - Véhicule thermique 100% essence (véhicule de référence) | VTH G          |
| - Véhicule thermique Superéthanol-E85                     | VTH E85        |
| - Véhicule Full Hybrid Superéthanol-E85                   | VFH E85        |
| - Véhicule Hybride rechargeable Superéthanol-E85          | VFH plugin E85 |
| - Véhicule électrique avec batterie de 60kWh              | VE             |
| - Véhicule électrique avec batterie de 80kWh              | VE+            |

Un seul segment est étudié ici, il s'agit du segment C qui caractérise des véhicules compacts comme la Peugeot 308, la Renault Mégane, etc. La masse du véhicule conventionnel segment C vaut 1427kg.

Chaque type de véhicule est caractérisé par des hypothèses de dimensionnement qui sont résumées sur la Figure 1. Sur cette figure, ENG désigne un moteur thermique, MEL une machine électrique et BAT une batterie.

## Direction Economie et Veille

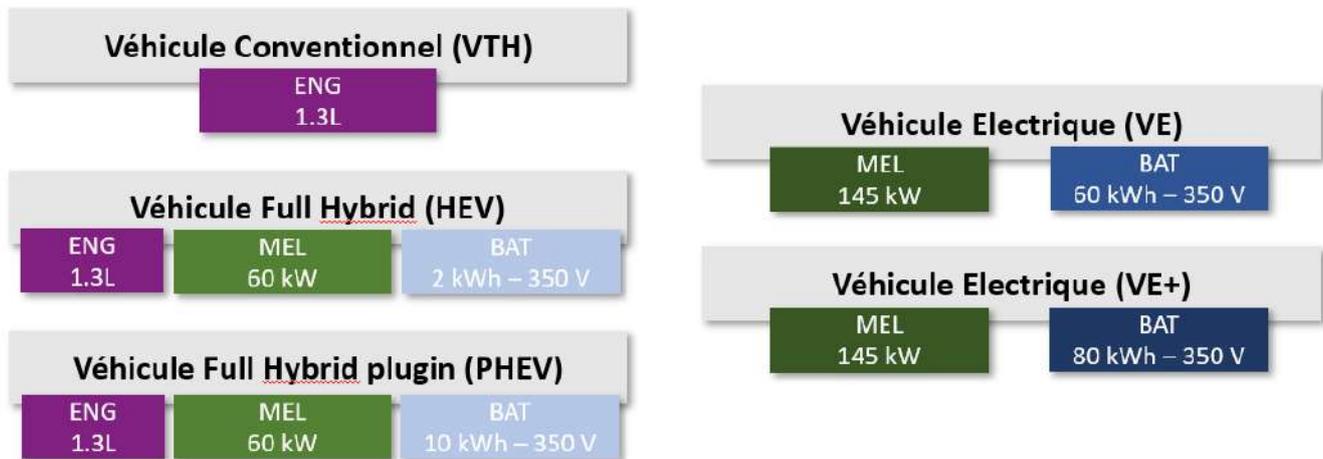


Figure 1 : Dimensionnements des groupes motopropulseurs des véhicules étudiés

Ces hypothèses de dimensionnement font référence à des composants dont les caractéristiques sont connues et sont utilisées pour le paramétrage des modèles de la simulation système. A noter que les désignations « VE » et « VE+ » font référence à des véhicules électriques de même puissance (145kW) mais avec des capacités de batteries différentes (respectivement 60 et 80 kWh).

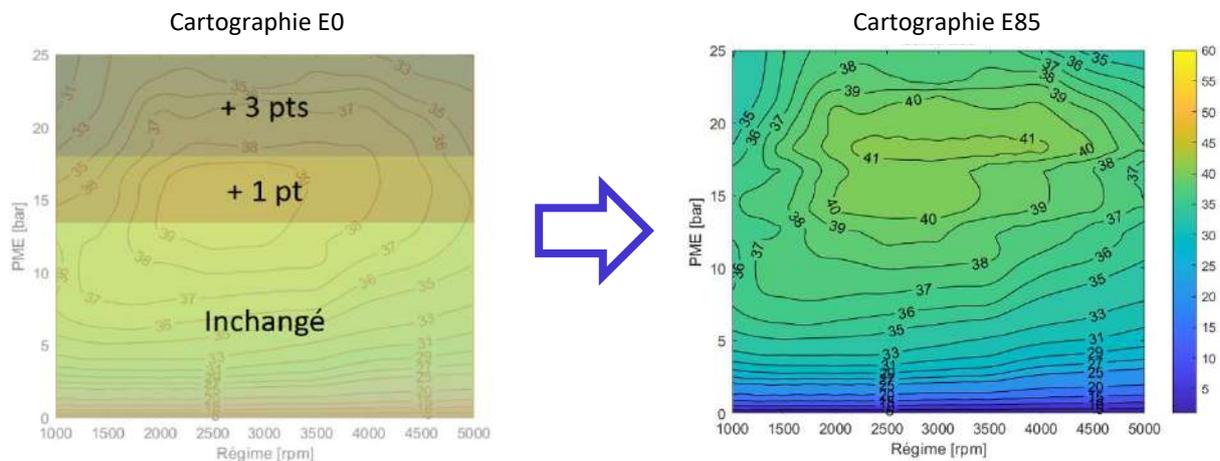
### 2.2.2. Hypothèses liées à l'introduction d'éthanol dans le carburant

L'étude se concentre sur l'intérêt du Superéthanol-E85 pour la réduction des émissions de GES des véhicules segment C. Il convient donc d'étudier l'impact de l'utilisation de Superéthanol-E85 sur la consommation énergétique des véhicules. Trois technologies de GMP sont concernées par cette étude : un véhicule thermique, un véhicule full hybride et un véhicule full hybride rechargeable.

Les hypothèses suivantes sont utilisées pour prendre en compte la part d'éthanol dans le carburant :

- Le carburant Superéthanol-E85 considéré est composé de **75% d'éthanol et 25% d'essence en volume**. Il s'agit d'une composition moyenne établie suite au constat de variations de composition en raison de contraintes climatiques (entre 60% et 75% d'éthanol en hiver et entre 75% et 85% d'éthanol en été, donnée SNPAA).
- Le **PCI** du carburant est modifié. Il est calculé à partir des PCI de l'essence et de l'éthanol (Prussi, 2020). La valeur obtenue pour le Superéthanol-E85 est de **30700 kJ/kg**, soit une réduction de 29% par rapport au PCI de l'E0 qui vaut 43200 kJ/kg. La **masse volumique** du carburant est modifiée de la même façon. La valeur obtenue est de **781 kg/m<sup>3</sup>**, soit une augmentation de 5% par rapport à la masse volumique de l'E0 qui vaut 743 kg/m<sup>3</sup>.
- Les **cartographies de consommation des moteurs thermiques** sont modifiées (voir Figure 2) pour prendre en compte l'impact de l'introduction d'éthanol. En effet, l'introduction d'éthanol dans un carburant a pour conséquence d'augmenter l'indice d'octane de ce carburant (ADEME, 2020). Cela permet alors d'augmenter la résistance à l'auto-allumage, de repousser la limite cliquetis et ainsi d'améliorer l'efficacité énergétique à forte charge via une optimisation du contrôle moteur. Pour traduire cette amélioration de rendement à forte charge, la modification de cartographie suivante est utilisée.

## Direction Economie et Veille



**Figure 2 : Modification de cartographie moteur pour représenter le passage d'un carburant E0 à un carburant Superéthanol-E85**

3 zones sont définies :

- A faible charge (inférieure à 14 bar), le rendement n'est pas modifié
- A plus forte charge (entre 14 et 18 bar), le rendement est augmenté de 1 point
- A très forte charge (au-delà de 18 bar), le rendement est augmenté de 3 points

Ces modifications de la cartographie moteur ont été justifiées par des résultats expérimentaux internes IFPEN et une revue de littérature.

- Au niveau des émissions de polluants locaux, le méthane et le protoxyde d'azote sont deux gaz à effet de serre. Ils ont respectivement un pouvoir de réchauffement global à 100 ans (PRG) de 28 et de 265<sup>1</sup>. D'après la littérature, les émissions de CH<sub>4</sub> sont de l'ordre de 10 à 30 mg/km pour une voiture Euro 6d fonctionnant à l'E85<sup>2</sup>, soit une fois ramené en CO<sub>2</sub> équivalent environ 0,9 gCO<sub>2, eq</sub>/km. Celles de N<sub>2</sub>O sont de l'ordre de 3 mg/km d'après Alltizer, 2018, ce qui représente environ 0,8 gCO<sub>2, eq</sub>/km.

Ces émissions de GES issues des émissions de méthane et protoxyde d'azote ne sont pas prises en compte dans la suite de l'étude, car elles ont un impact faible sur le réchauffement climatique en comparaison des émissions de CO<sub>2</sub>. De même, les émissions de polluants locaux (NOx, HC, CO et particules) ne sont pas étudiées dans le cadre de cette étude car elles n'ont pas d'impact sur le réchauffement climatique. L'étude ADEME E4F propose des résultats concernant l'impact de l'utilisation de superéthanol-E85 sur ces émissions.

### 2.2.3. Projections aux horizons 2030 et 2040

Plusieurs horizons temporels sont étudiés : 2022, 2030 et 2040. La projection à ces différents horizons fait appel aux hypothèses de dimensionnement données dans le tableau suivant.

<sup>1</sup> [IPCC 2001 Third Assessment Report page on Global Warming Potentials](#)

<sup>2</sup> Etude ADEME E4F

## Direction Economie et Veille

	2022	2030	2040
Densité cellules batterie	170 Wh/kg		200 Wh/kg
Densité cellules batterie BEV - grande capacité > 30 kWh	250 Wh/kg		500 Wh/kg
Densité de puissance machine électrique	2.5 kW/kg	Résultats intermédiaires entre les	3 kW/kg
Rendement moyen électronique de puissance	90 %	résultats 2022 et 2040 (avec plus d'évolution entre 2022 et 2030 qu'entre 2030 et 2040)	95 %
Rendement de charge réseau	81 %		90 %
Résistance aérodynamique véhicules	-		Réduction 10 %
Résistance roulement véhicules	-		Réduction 20 %
Masse carcasse	-		Réduction 10 %
Masse transmission et moteur thermique	-		Réduction 10 %
Rendement moteur thermique (E0)	39%		43%

**Figure 3 : Hypothèses énergétiques des véhicules pour les horizons actuels et futurs**

Les hypothèses pour 2022 et 2040 sont utilisées pour paramétrer les modèles de véhicules. Les résultats pour l'horizon 2030 sont ensuite calculés à partir des résultats pour 2022 et 2040 en considérant que plus de progrès techniques seront réalisés entre 2022 et 2030. Il est ici supposé que 2/3 des progrès auront lieu entre 2022 et 2030 et 1/3 aura lieu entre 2030 et 2040.

### 2.2.4. Cycles de conduite

Les véhicules définis précédemment sont simulés sur des **cycles représentatifs de conditions de conduite** différentes. 4 cycles sont utilisés dans le cadre de cette étude :

- Le cycle *ARTEMIS urbain* qui représente un usage en milieu urbain, avec une vitesse moyenne de 18 km/h et une durée de 993s pour 4,9km
- Le cycle *ARTEMIS road* qui représente un usage en milieu extra-urbain, avec une vitesse moyenne de 57km/h et une durée de 1082s pour 17,3km
- Le cycle *ARTEMIS motorway* qui représente un usage en milieu autoroutier, avec une vitesse moyenne de 99km/h et une durée de 1068s pour 29,5km
- Le cycle normalisé *WLTC* (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle) qui représente un usage mixte, avec une phase en milieu urbain, une phase en milieu extra-urbain et une phase en milieu autoroutier, une vitesse moyenne de 46km/h et une durée de 1800s pour 23,3km.

Les cycles ARTEMIS proviennent de travaux dédiés à la définition de cycles caractéristiques de l'usage des véhicules en Europe et en France (Andre, 2004).

### 2.2.5. Modes de simulation pour les véhicules hybrides

Chaque véhicule est simulé à l'aide des outils présentés précédemment dans le but de déterminer la consommation correspondant à son usage. La consommation retenue est différente en fonction du type de véhicule. Par exemple, pour un véhicule électrique, on relève la consommation électrique au niveau du réseau liée à l'utilisation de l'énergie stockée dans la batterie et pour un véhicule thermique conventionnel la consommation de carburant liée à l'utilisation du moteur thermique. Pour les véhicules hybrides, le résultat est moins immédiat. En effet, un véhicule hybride peut avoir deux fonctionnements différents : le fonctionnement en « **charge depleting** » (CD) qui s'apparente au fonctionnement d'un véhicule électrique et est donc principalement associé à une consommation électrique et le fonctionnement en « **charge sustaining** » (CS) qui consiste à viser un bilan « batterie nul », c'est-à-dire que l'état de charge final de la batterie est proche de son état de charge initial. Pour les véhicules hybrides non-rechargeables, les simulations sont systématiquement réalisées en CS et la consommation retenue est une consommation corrigée afin de prendre en compte l'écart au bilan batterie nul. Afin de réaliser ces simulations en

## Direction Economie et Veille

CS, une méthode est appliquée pour trouver le facteur d'équivalence optimal (tel que la variation d'état de charge de batterie soit inférieure à 5% par exemple). Le **facteur d'équivalence** « s » est un paramètre qui traduit la répartition de la demande en puissance entre la branche électrique et la branche thermique. Il est aussi utilisé dans le calcul de la **consommation corrigée** suivant :

$$Conso_{corr} = Conso - \frac{\int U_{OCVbatt} * I_{batt}}{PCI_{carb}} * s$$

Image de l'état de charge final de la batterie

Pour les véhicules hybrides rechargeables, les deux résultats de consommation en fonctionnement CD et CS sont utilisés. Ils permettent ensuite de déterminer les consommations correspondant à des usages mixtes entre ces deux fonctionnements, en fonction de la fréquence de la recharge électrique. Afin de traduire ces différents cas, deux résultats sont présentés dans la suite de l'étude pour les véhicules hybrides rechargeables : un résultat « **homologation** » qui correspond à un usage environ 70% en CD et 30% en CS et un résultat « **réel** » qui correspond à un usage environ 40% en CD et 60% en CS. La définition de l'usage « réel » est issue d'une étude statistique de l'usage réel des PHEV (Patrick Plötz, 2020).

### 2.2.6. Résumé des cas d'étude

Les hypothèses présentées dans les paragraphes précédents sont utilisées pour paramétrer les simulateurs correspondant aux différents véhicules avec leurs cas d'usage associés. Ainsi, les sept véhicules présentés dans le paragraphe 2.2.1 (avec la référence « conventionnel E0 ») sont simulés sur les quatre cycles présentés dans le paragraphe 2.2.4 et sur les trois horizons temporels présentés dans le paragraphe 2.2.3. Pour les PHEV, plusieurs cas d'étude sont considérés : CD, CS, homologation, réel (cf paragraphe 2.2.5).

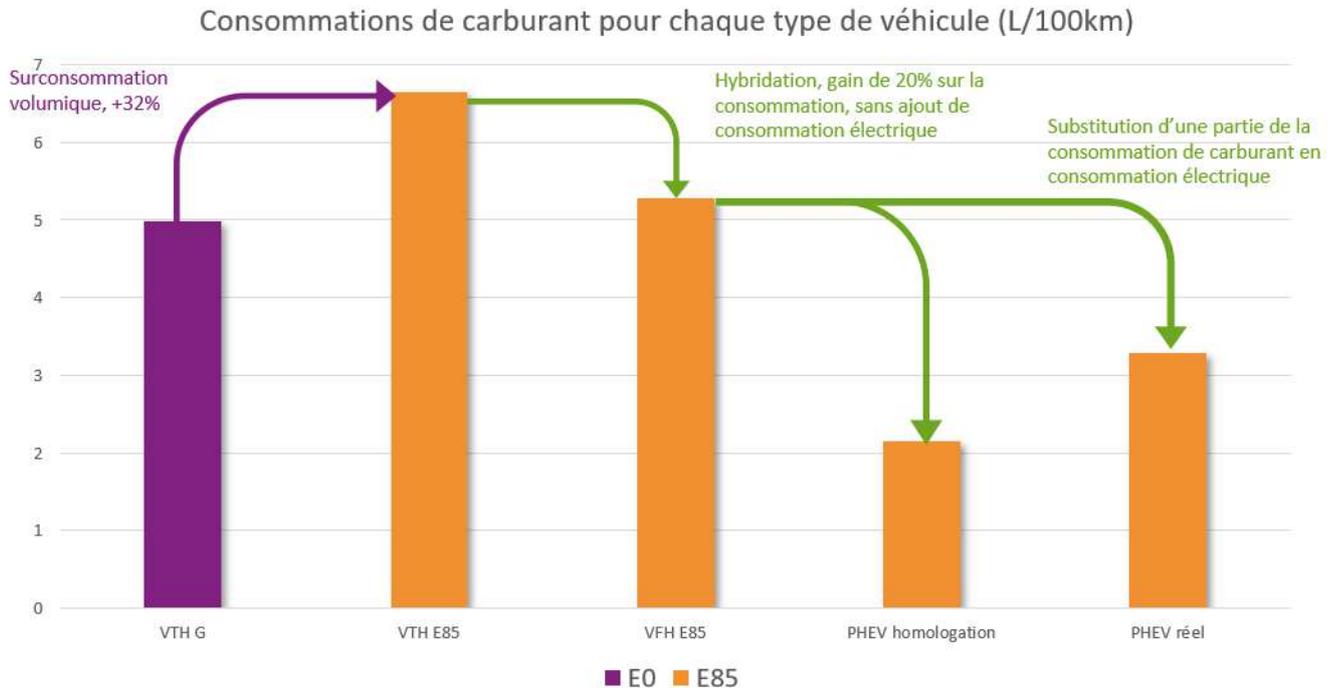
## 2.3. Résultats

Les simulations présentées précédemment permettent d'obtenir les résultats en termes de consommation de carburant ou d'électricité pour les différents cas d'usage. L'étude des points de fonctionnement moteur pour les véhicules fonctionnant au Superéthanol-E85 permet de conclure quant à l'impact de l'utilisation de ce carburant sur la consommation. Pour un véhicule thermique, les points de fonctionnement moteur sont imposés par le cycle de conduite et les caractéristiques du véhicule. Plus ils se situent à forte charge, plus le rendement moteur est amélioré par l'introduction de Superéthanol-E85 et plus la surconsommation par rapport au E0 est réduite. Ces **zones de fort rendement** sont cependant peu atteintes au cours des cycles étudiés. Pour un véhicule hybride, ces zones sont plus souvent atteintes car l'hybridation permet de privilégier les points de fonctionnement de meilleur rendement en utilisant la batterie pour stocker l'énergie. Malgré cela, le gain lié à l'utilisation de Superéthanol-E85 reste limité sur tous les cycles. Ainsi, on retrouve que la diminution de PCI induit une **surconsommation volumique d'environ 32 %** et une surconsommation massique d'environ 38 % par rapport à l'E0 pour un véhicule thermique en considérant les mêmes points de fonctionnement moteur.

L'étude comparative des résultats homologation et réel pour les PHEV met en lumière l'importance de la **définition de l'usage** pour un tel véhicule. En effet, les consommations de carburant réelles sont jusqu'à 2 fois plus élevées que les consommations d'homologation.

**Ensuite, il est intéressant de comparer les consommations de carburant entre les différents types de véhicules.**

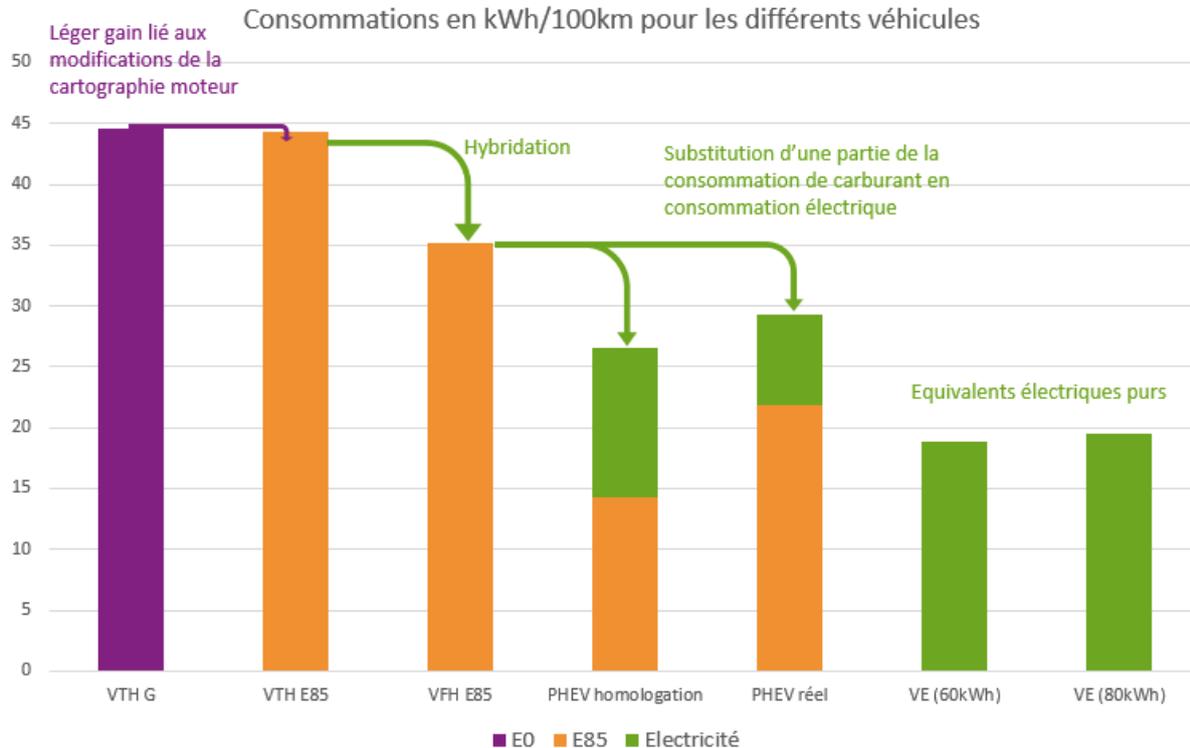
La Figure 4 présente ces résultats pour les véhicules thermiques et hybrides sur le cycle WLTC et pour l'horizon 2022. Elle met en avant la **surconsommation volumique** induite par l'utilisation de Superéthanol-E85 décrite précédemment, due à la différence de PCI des deux carburants et le gain de consommation liée à l'**hybridation**.



**Figure 4 : Graphique représentant les consommations de carburant pour les différents types de véhicules (L/100km)\***

*\*Attention aux résultats des PHEV qui sont incomplets car il faut ajouter à la consommation de carburant présentée une consommation électrique liée aux phases de fonctionnement en « charge depleting ». Le cas réel pour les PHEV montre une consommation de carburant supérieure à celle du cas homologation car le fonctionnement « charge sustaining » est plus fréquent et le moteur thermique est plus souvent sollicité (la consommation électrique associée est alors plus faible).*

Afin de comparer ces consommations à celles des véhicules électriques équivalents, il faut les traduire en **consommations énergétiques** (en kWh/100km). La Figure 5 présente ces résultats comparés. La comparaison entre les consommations des véhicules thermiques E0 et E85 fait apparaître le léger gain énergétique lié aux modifications de la cartographie moteur. On retrouve aussi le gain apporté par l'hybridation. On peut ensuite visualiser le résultat total pour les PHEV en sommant les consommations de carburant et d'électricité. Finalement, les véhicules qui ont les plus faibles consommations énergétiques sont les véhicules électriques en raison de la meilleure efficacité des composants de la branche électrique. La consommation énergétique d'un véhicule électrique est environ 2 fois moins importante que son équivalent full hybride.



**Figure 5 : Graphique représentant les consommations énergétiques des différents types de véhicules (kWh/100km)**

D'autre part, l'étude des résultats pour les horizons 2030 et 2040 permet de quantifier l'impact des progrès techniques et technologiques sur les consommations des différents véhicules. Par exemple, un véhicule thermique E85 connaît une diminution de consommation de presque 1L/100km entre 2022 et 2040 et un véhicule électrique avec une batterie de 60 kWh connaît une diminution de consommation de 6kWh/100km entre 2022 et 2040 en raison des améliorations supposées sur les hypothèses énergétiques (voir Figure 3).

## 2.4. Conclusions et limites de l'étude

Les outils de **simulation système** ont permis d'obtenir des résultats en termes de consommation de carburant et d'électricité sur cycles. La maîtrise des différents modèles et hypothèses a permis de comparer de façon exhaustive les différents véhicules ciblés par l'étude.

Des **hypothèses spécifiques à l'introduction de bioéthanol** dans le carburant ont été utilisées pour tenter de se rapprocher des résultats expérimentaux observés avec l'E85. Ainsi, en plus de la modification de PCI, des modifications de cartographie moteur ont été introduites. Sur les cycles étudiés, leur impact est cependant limité en raison du nombre limité de points de fonctionnement à forte charge.

Des **hypothèses de projection** ont aussi été introduites pour traduire les gains énergétiques et structurels futurs des véhicules.

Les résultats énergétiques obtenus sont ensuite utilisés comme **entrées des modèles ACV** où sera aussi pris en compte entre autres l'impact de la production en amont des différents vecteurs énergétiques.

Les limites de l'étude concernent le **manque de données expérimentales** pour valider les hypothèses concernant la modification de cartographie moteur liée à l'introduction de Superéthanol-E85. D'autre part, l'étude pourrait aussi être étendue à d'autres segments de véhicules afin d'être plus globale et de mieux caractériser l'ensemble du parc automobile. Il se peut que les résultats varient pour différents segments.

## 3 Analyse du Cycle de Vie

### 3.1 Objectif et champ de l'étude

Cette étude a pour objectif d'analyser les évolutions dans le temps des impacts sur le changement climatique de véhicules thermique, hybride et hybride rechargeable consommant de l'E85 par rapport à un véhicule électrique.

L'étude d'impact est réalisée par la méthode d'Analyse du Cycle de Vie conformément aux normes ISO 14040 & 14044 et prend en compte les émissions de gaz à effet de serre du cycle de vie du véhicule et de l'énergie nécessaire à son fonctionnement.

Afin d'analyser l'évolution des impacts dans le temps, l'étude portera sur un état des lieux à différents horizons temporels : 2022, 2030 et 2040.

Le périmètre géographique sélectionné pour cette étude est le périmètre français bien que certaines analyses de sensibilité étendent l'étude au périmètre européen.

L'étude portera sur des véhicules de type segment C. Les émissions de gaz à effet de serre des cycles de vie véhicules et carburants sont comparées à celles du véhicule Essence « équivalent ». Les motorisations étudiées fonctionnant à l'E85 sont : le thermique (sans hybridation), l'hybride non rechargeable (full hybrid) et l'hybride rechargeable (PHEV).

L'ACV a été réalisée à l'aide du logiciel commercial d'ACV SimaPro® version 9.2.0.2. La base de données utilisée est Ecoinvent v.3.8. La modélisation choisie est par défaut « allocation, cut-off by classification ».

La sensibilité de différents paramètres du cycle de vie de la voiture et de l'énergie nécessaire à son fonctionnement sera analysée.

#### 3.1.1 Frontières du système

Les infrastructures, les routes et les bornes de recharge ont été exclues du périmètre de l'étude. Les étapes considérées sont celles présentées dans la Figure 6. Sur l'axe horizontal, l'ensemble des étapes du cycle de production des carburants est pris en compte : de l'extraction des matières premières jusqu'au réservoir du véhicule (Well to Tank) à l'utilisation du carburant (Tank to Wheel). Sur l'axe vertical propre au véhicule, il y a deux composantes : le cycle de vie du véhicule et le fonctionnement véhicule via l'utilisation du carburant. L'étude menée est donc qualifiée du puits à la roue ou Well to Wheel (WtW) avec la prise en compte du cycle de vie véhicule en plus. Un seul indicateur environnemental est regardé dans cette étude. Il s'agit de l'indicateur du potentiel de changement climatique (Climate change). La méthode de caractérisation sélectionnée pour la modélisation de cet indicateur est la méthode EF 3.0 recommandée par la Commission Européenne.

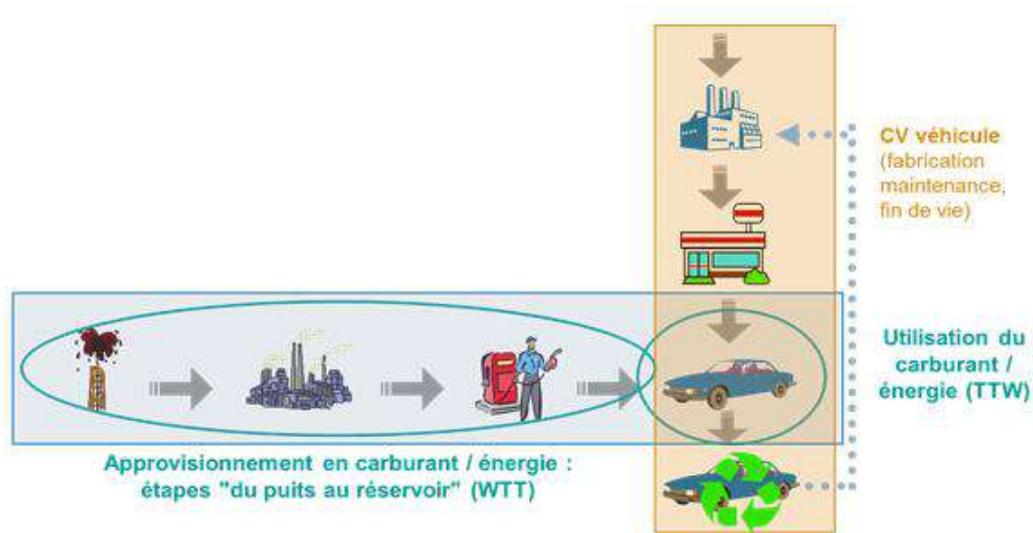


Figure 6 : Etapes considérées dans le périmètre WtW incluant le cycle de vie véhicule

### 3.1.2 Unité fonctionnelle

Dans le cadre de cette étude, une fonction inhérente aux véhicules étudiés est identifiée : le transport de personnes. En effet, les véhicules particuliers permettent de transporter un nombre de personnes sur une distance donnée dans le cadre d'un trafic particulier. Dans les résultats du rapport, le nombre de personnes n'intervient pas dans l'unité fonctionnelle. L'unité fonctionnelle retenue pour les véhicules est le transport d'une personne sur une distance d'1 km dans un contexte de trafic donné.

### 3.1.3 Scénarios étudiés

Plusieurs scénarios ont été réalisés afin de répondre à l'objectif de l'étude (voir Tableau 1) :

Tableau 1 Ensemble des scénarios considérés dans l'étude

	2022	2030	2040
Kilométrage total (en km)	150 000 250 000	150 000 250 000	150 000 250 000
VTH (essence) (véhicule thermique)	100% ref. foss. 2022	100% ref. foss. 2022	100% ref. foss. 2022
VTH E85			
Full-Hybride E85	75% bioethanol (2022)	75% bioethanol (2030)	75% bioethanol (2040)
PHEV E85 (homologation) (véhicule électrique hybride plug-in)	25% ref. foss. 2022	25% ref. foss. 2022	25% ref. foss. 2022
PHEV E85 (réel) (véhicule électrique hybride plug-in)			
BEV (véhicule électrique à batterie)	60 kWh 80 kWh	60 kWh 80 kWh	60 kWh 80 kWh

En complément, plusieurs analyses de sensibilité ont été réalisées (voir Tableau 2) :

**Tableau 2 Analyses de sensibilité réalisées dans l'étude**

	2022	2030	2040
Analyse de la réduction de GES sur la production d'éthanol			
VTH E85 Full-Hybride E85 PHEV E85		GES bioéthanol : réduction par rapport à la référence fossile de 85%	GES bioéthanol : réduction par rapport à la référence fossile de 95%
Analyse de l'impact lié à une modification de la composition du carburant			
VTH E85 Full-Hybride E85 PHEV E85			75% bioéthanol 12,5% ref. foss. 2022 12,5% e-gasoline
VTH E85 Full-Hybride E85 PHEV E85			75% bioéthanol 25% e-gasoline

## 3.2 Inventaires du cycle de vie

### 3.2.1 Les véhicules étudiés et vecteurs énergétiques

#### 3.2.1.1 Description des véhicules étudiés

Le dimensionnement des motorisations étudiées se trouve sur la Figure 1

On fait ici l'hypothèse que les véhicules sont assemblés en France et également utilisés en France. Trois horizons temporels ont été considérés dans le cadre de cette étude : l'actuel (2022), 2030 et 2040.

Les véhicules particuliers ont été modélisés selon le découpage suivant :

- Caisse en blanc du véhicule avec options et boîte de vitesse
- Moteur thermique
- Moteur électrique et génératrice
- Batterie

La composition matière des véhicules s'appuie sur le rapport IMPRO CAR II « Feebate and scrappage policy instruments » du JRC. Les données du « small petrol engine » ont été utilisées.

Le choix des matériaux utilisés ainsi que leur mise en forme pour la modélisation des carcasses des véhicules personnels sont basés sur le procédé Ecoinvent « glider, passenger car ».

La consommation d'énergie : électricité et gaz naturel, pour la fabrication des véhicules est basée sur le rapport IMPRO CAR I « Environmental Improvement of Passengers Cars » du JRC pour le segment C (JRC, 2008). Un rendement de 70 % pour la conversion du gaz naturel en chaleur a été considéré.

#### Les véhicules à l'horizon 2030 et 2040

Les véhicules à l'horizon 2040 sont modélisés d'après les véhicules considérés en 2022. Seul un allègement des véhicules a été pris en compte en se fondant sur le rapport réalisé par PE International et Gingko21 pour l'ADEME

## Direction Economie et Veille

(ADEME, 2012) : « Il a été décidé avec les constructeurs que l'allègement du véhicule serait principalement modélisé par l'intégration d'une fraction d'aluminium plus importante. Les constructeurs ont fait l'hypothèse d'une réduction de 100 kg du poids ». Partant du constat que cette hypothèse s'appliquait aux véhicules du segment C, un pourcentage en fonction des poids des véhicules a été calculé. Cela représente ainsi le remplacement de 30 % de l'acier du véhicule (diminution de la quantité d'acier de 30 % en masse), par une quantité d'aluminium correspondant à 65 % de ces 30 % d'acier. Pour l'horizon 2030, une hypothèse intermédiaire a été considérée. On considère le remplacement de 15% de l'acier du véhicule par une quantité correspondant à 65% de ces 15% d'acier.

### 3.2.1.2 Pneus

La détermination du poids et la composition des pneus des véhicules particuliers et des VUL sont basés sur le rapport IMPRO CAR I « Environmental Improvement of Passengers Cars » du JRC (JRC, 2008).

La durée de vie des pneus est supposée égale à 40.000 km quel que soit le type de véhicule considéré et quelle que soit l'année considérée.

### 3.2.1.3 Batteries

Les batteries sont modélisées d'après le rapport ADEME/Sphera « Analyse du cycle de vie relative à l'hydrogène » de septembre 2020 (ADEME, Analyse du cycle de vie relative à l'hydrogène, 2020) et GREET (GREET, 2020) en considérant la technologie Lithium-ion NMC622 (Lithium-ion Nickel Manganèse Cobalt).

En 2022 : on considère que les batteries sont produites en Chine. Les émissions de gaz à effet de serre associées à leur production sont de **109 kg CO2 eq. / kWh (sans fin de vie) et 96 kg CO2 eq. / kWh (avec fin de vie)** de batterie modélisée, ce qui est conforme aux ordres de grandeur que l'on peut trouver dans la littérature.

En 2040 : on considère que les batteries sont produites en Europe. Les émissions de gaz à effet de serre associées à leur production sont d'environ **87 kg CO2 eq. / kWh (sans fin de vie) et 57 kg CO2 eq. / kWh (avec fin de vie, hypothèse forte de valorisation de matériaux)**.

En 2030, une hypothèse intermédiaire est utilisée. Les émissions de gaz à effet de serre associées à leur production sont d'environ 98 kg CO2 eq. / kWh (sans fin de vie) et 76,5 kg CO2 eq. / kWh (avec fin de vie).

La durée de vie des batteries (en km) évolue en fonction des horizons temporels. On considère des durées de vie (en km) de 150,000 km, 200,000 km et 250,000 km pour respectivement les horizons temporels 2022, 2030 et 2040. Des analyses de sensibilité de cette durée de vie sont réalisées dans cette étude.

### 3.2.1.4 Vecteurs énergétiques

#### Essence fossile

L'essence est modélisée d'après la donnée Ecoinvent 3.8 « Petrol, low-sulfur {Europe without Switzerland} | market for | Alloc Rec, U ».

L'essence fossile est identique pour les trois horizons temporels (Tableau 3).

## Direction Economie et Veille

**Tableau 3 Emissions GES WtW de l'essence fossile**

Essence fossile	2022 Scenario de référence	2030	2040
Référence donnée	Ecoinvent 3.8 JEC v5	2022 Scenario de référence	2022 Scenario de référence
GES (en kg CO <sub>2</sub> eq./MJ)	88,3	88,3	88,3

Pour la production amont, les émissions liées à la production du pétrole et son raffinage sont de 14,9 g CO<sub>2</sub> eq. / MJ (source Ecoinvent 3.8).

Pour l'utilisation, les émissions uniquement de CO<sub>2</sub> associées à la combustion sont de 73,4 g CO<sub>2</sub> eq. / MJ (source JEC v5). Les impacts sur le changement climatique des émissions d'autres molécules à l'échappement telles que le méthane ne sont pas prises en compte dans cette étude. On obtient au total la valeur de 88.3 g CO<sub>2</sub>-eq / MJ en Well-to-wheel.

### E-gasoline

Pour l'horizon temporel 2040, une analyse de sensibilité est réalisée. Dans celle-ci, on considère que l'essence fossile contenue dans l'E85 est partiellement ou intégralement remplacée par de l'e-gasoline. Les e-carburants sont une classe de carburants de remplacement qui sont fabriqués en utilisant de l'électricité issue de sources décarbonées et du CO<sub>2</sub> capté. Les e-fuels au sens strict utilisent un CO<sub>2</sub> neutre vis-à-vis du climat, soit capté directement dans l'air (Direct Air Capture) soit issu de la biomasse. Dans le cas où ce CO<sub>2</sub> serait capté sur une source industrielle alors il doit démontrer qu'il permet une réduction d'émissions de CO<sub>2</sub> de 70% d'après la RED III en cours de discussion. On considèrera pour l'étude que le CO<sub>2</sub> est d'origine biogénique.

Pour modéliser le e-gasoline on considère une production d'essence à partir de méthanol (à partir de CO<sub>2</sub> capté et d'H<sub>2</sub>) avec 80% des émissions de CO<sub>2</sub> captés pendant les procédés (procédés exothermiques). Le transport de l'essence de l'usine au site de distribution est pris en compte. Une valeur de 15,8 g CO<sub>2</sub>eq. / MJ est obtenue pour 2040 avec un mix électrique français de 54,3 g CO<sub>2</sub>eq. / kWh utilisé pour la production de cet e-carburant. Le CO<sub>2</sub> capté est considéré d'origine biogénique afin d'assurer la neutralité carbone.

### Electricité

Le mix moyen français issu de la base de données Ecoinvent 3.8 a été utilisé pour l'horizon 2022 : « Electricity, medium voltage {FR} | market for | Alloc Rec, U ». Pour les horizons temporels 2030 et 2040, on considère l'intégration du scénario RTE MO sur la production d'électricité avec des importations neutres (scénario RTE au contenu carbone le plus élevé). Les valeurs des émissions de GES associés à ces mix électriques se retrouvent dans le Tableau 4.

**Tableau 4 Contenu carbone du mix électrique français pour les trois horizons temporels**

Mix électrique Français	2022	2030	2040
Source	Ecoinvent 3.8	RTE scénario MO	RTE scénario MO
GES (en g CO <sub>2</sub> eq./kWh)	80,2	68,7	54,3

## Direction Economie et Veille

Pour les horizons temporels 2022 et 2030, une analyse de sensibilité est réalisée. Dans celle-ci, pour l'électricité utilisée pour la recharge du véhicule électrique et des véhicules hybrides rechargeables, le mix électrique français est remplacé par le mix électrique européen. Pour l'horizon 2022, la valeur de 395,2 g CO<sub>2</sub>-eq/ kWh issue de la base de données Ecoinvent 3.8 est utilisée pour obtenir le mix européen. Pour 2030, une valeur de 233,3 g CO<sub>2</sub>-eq/ kWh est utilisée pour le mix électrique européen.

### Le bioéthanol

On considère dans cette étude 75% de bioéthanol et 25% d'essence fossile dans l'E85.

En 2022, les émissions liées à la production et à la combustion du bioéthanol sont basées sur les données DGEC de l'année 2021. On retrouve sur la Figure 7 la répartition des matières premières utilisées en France pour la production d'éthanol. Grâce aux données présentes sur la plateforme Carbure (DGEC) (CARBURE, s.d.) indiquant en pourcentage les gains des émissions pour l'éthanol à partir de chaque matière première en comparaison de l'essence fossile, il est possible de déterminer la valeur des émissions de GES moyen pour l'éthanol en France pour l'horizon 2022 (Tableau 5).

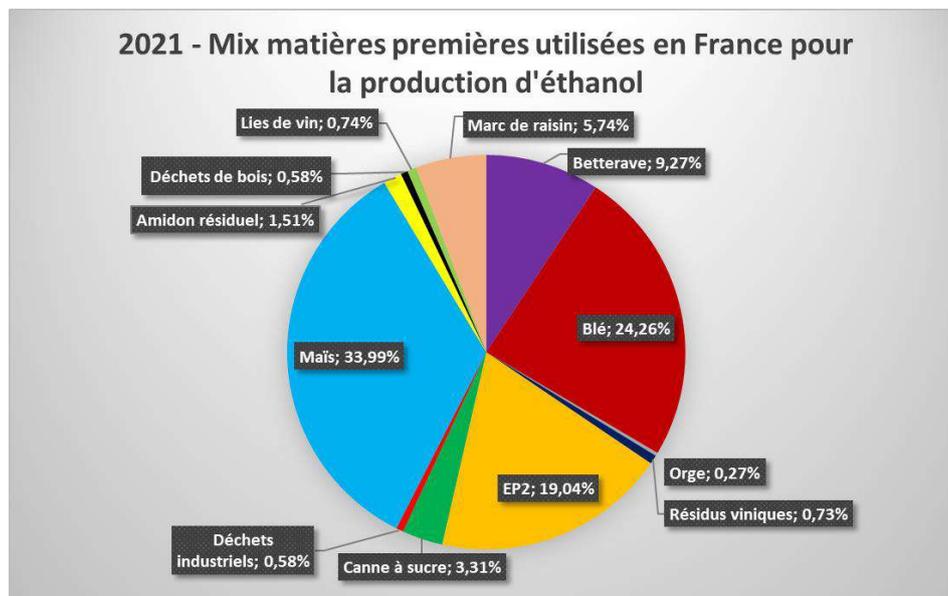


Figure 7: Répartition des matières premières utilisées en France pour la production d'éthanol

## Direction Economie et Veille

**Tableau 5 Calcul de la valeur des émissions de GES moyen pour l'éthanol en France**

Produits	2021		
	Pourcentage dans le mix (en %)	Gain GES (en %)	Impact CO <sub>2</sub> (en g CO <sub>2</sub> -eq/MJ)
Betterave	9,27%	57,01%	36,03
Blé	24,26%	63,18%	30,86
Orge	0,27%	68,32%	26,55
Résidus viniques	0,73%	69,22%	25,79
EP2	19,04%	67,91%	26,89
Canne à sucre	3,31%	78,51%	18,01
Déchets industriels	0,58%	75,42%	20,60
Maïs	33,99%	67,64%	27,12
Amidon résiduel	1,51%	105,40%	-4,53
Déchets de bois	0,58%	87,00%	10,89
Lies de vin	0,74%	61,53%	32,24
Marc de raisin	5,74%	73,73%	22,01
<b>TOTAL</b>			<b>27,63</b>

NB : EP2 : Egouts Pauvres de 2<sup>ème</sup> extraction (résidus sucriers)

On obtient donc une valeur de 27,63 g CO<sub>2</sub>-eq / MJ d'éthanol en 2021. Cette valeur est utilisée dans cette étude pour l'horizon 2022. Cela correspond à une réduction de 67% par rapport à la référence fossile qui est de 83.8 g CO<sub>2</sub>-eq / MJ (valeur DGEC). Les valeurs d'émissions de GES sont calculées selon la méthodologie décrite par l'annexe V de la directive 2009/28/CE relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, qui prend en compte les changements d'affectation des sols directs, et auditées annuellement.

Il convient de préciser que la DGEC a mis à jour les données sur CarbuRe après la fin de la partie "calculs" de l'étude. Le taux de réduction de GES du bioéthanol consommé en France en 2021 est en fait de 70,6%, correspondant à un niveau moyen de 24,63 gCO<sub>2</sub>eq/MJ. On considère l'impact assez faible sur le résultat final, les calculs n'ont pas été refaits.

Pour les horizons 2030 et 2040, des hypothèses de réduction des émissions de GES ont été fournies par le SNPAA. Pour 2030 et 2040, il est envisagé une réduction de 80% et 90% respectivement des émissions de GES par rapport à la référence fossile (valeur de 2022). Le graphique de la Figure 8, provenant de l'association ePURE<sup>3</sup> montre l'évolution de la réduction d'émissions de GES pour l'éthanol au niveau européen entre 2010 et 2020. Les hypothèses de réduction des émissions de GES pour 2030 et 2040 en France se basent sur ce graphique. En effet, historiquement, les émissions de la filière éthanol en France ont fortement diminuées et peuvent encore le faire en généralisant :

- La captation du CO<sub>2</sub> de fermentation
- Le passage d'une chaudière à gaz à une chaudière à biomasse
- L'amélioration de l'efficacité énergétique du procédé
- Le recours à des résidus ou des déchets (Ethanol de 2G)

<sup>3</sup> [www.epure.org](http://www.epure.org)

### Average certified GHG emission savings in %

Since 2011 the average certified greenhouse gas emission savings of renewable ethanol against fossil fuel have increased continuously, reaching 75.5% in 2020.



Source: Aggregated and audited data of ePURE members under RED I methodology, compared to a fossil fuel comparator of 83.8 gCO<sub>2</sub>eq/MJ

**Figure 8 Réduction des émissions de GES pour l'éthanol européen**

On retrouve les valeurs des émissions de GES de l'éthanol pour les différents horizons temporels dans le Tableau 6.

**Tableau 6 valeurs des émissions de GES de l'éthanol pour les différents horizons temporels**

Bioéthanol	2022	2030	2040
Hypothèse de réduction par rapport à la référence fossile: <b>83.8 gCO<sub>2</sub>-eq/MJ</b>	67%	80%	90%
GES (en kg CO <sub>2</sub> eq./MJ)	27,63	16,78	8,39

Pour 2030 et 2040, des analyses de sensibilité sont réalisées dans lesquelles, on considère respectivement une réduction des émissions de GES de 85% et 95% par rapport à la référence fossile (valeur de 2022).

### 3.2.2 Fin de vie

La fin de vie a été modélisée selon la méthode des impacts évités prenant ainsi en compte les impacts environnementaux liés aux phases de valorisation ainsi que les impacts évités des matériaux valorisés.

#### Fin de vie véhicules

Le scénario de fin de vie des véhicules est modélisé à partir du rapport de PE International et Gingko21 pour l'ADEME (ADEME, Elaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions GES et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et thermiques,, 2012): « Les constructeurs automobiles, membres du comité technique, nous ont transmis un scénario réaliste de recyclage des VHU<sup>4</sup> post 2015 (France) et permettant l'atteinte des taux réglementaires ». Ainsi, la plupart des taux fournis

<sup>4</sup> VHU : Véhicules Hors d'Usage

## Direction Economie et Veille

concernant la proportion de recyclage, incinération, mise en décharge par type de matériaux a été réutilisée. D'autres informations sur les consommations énergétiques pour le recyclage des matériaux ainsi que des distances moyennes de collecte entre les centres de tri et les infrastructures de valorisation des matériaux ont été utilisées. La Directive 2000/53/CE du Parlement européen et du Conseil du 18 septembre 2000 relative aux véhicules hors d'usages a également été suivie.

Le taux de collecte des VHU en 2010 (69 %) a été utilisé faute d'informations plus récentes. Les distances du détenteur au démolisseur puis du démolisseur au broyeur ont également été prises en compte. Enfin, des statistiques de déchets ont été utilisées afin de modéliser la part des matériaux partant en incinération ou en décharge.

### Fin de vie des pneus

Le scénario de fin de vie des pneus s'appuie en partie sur une étude réalisée pour l'ADEME intitulée « Transport et logistique des déchets » parue en octobre 2014 (ADEME, Transport et logistique des déchets, 2014). Le taux de collecte des pneus est supposé identique à celui des VHU, de même que les caractéristiques logistiques liées à leur acheminement sur les différents sites. Les mêmes statistiques de déchets ont été utilisées afin de modéliser la part des matériaux partant en incinération ou en décharge.

### Fin de vie des batteries

La fin de vie des batteries est un sujet complexe tant du fait des solutions techniques à mettre en œuvre que de leur viabilité. Une Directive existe concernant ce sujet : la Directive 2006/66/CE du Parlement européen et du Conseil, relative aux piles et accumulateurs ainsi qu'aux déchets de piles et d'accumulateurs.

Dans cette étude, la fin de vie des batteries a été modélisée d'après deux techniques différentes considérées en proportion équivalente : le traitement hydrométallurgique et le traitement pyrométallurgique. Ces deux traitements sont basés sur les procédés Ecoinvent : « Used Li-ion battery {GLO}| treatment of used Li-ion battery, hydrometallurgical treatment » et « Used Li-ion battery {GLO}| treatment of used Li-ion battery, pyrometallurgical treatment ». En revanche, c'est la modélisation conséquentielle qui a été utilisée afin de définir des scénarii de fin de vie plausibles dans une optique de méthodologie des impacts évités.

## 3.3 Résultats évaluation des impacts potentiels sur le changement climatique

Le Tableau 7 présente l'ensemble des simulations réalisées pour ce rapport.

**Tableau 7 Ensemble des simulations présentées dans les résultats**

Simulation	Horizon	Cycle de conduite	Durée de vie véhicule (km)	Durée de vie batterie (km)	% de réduction des GES pour l'éthanol	Mix électrique considéré (pour les véhicules électriques)	Composition E85
1	2022	WLTC	150,000	150,000	67	Français	75% ethanol 25% essence fossile (2022)
2	2022	Urbain	150,000	150,000	67	Français	75% ethanol 25% essence fossile (2022)

## Direction Economie et Veille

3	2022	Routier	150,000	150,000	67	Français	75% ethanol 25% essence fossile (2022)
4	2022	Autoroute	150,000	150,000	67	Français	75% ethanol 25% essence fossile (2022)
5	2022	WLTC	150,000	150,000	67	Européen	75% ethanol 25% essence fossile (2022)
6	2022	WLTC	250,000	250,000	67	Français	75% ethanol 25% essence fossile (2022)
7	2022	WLTC	250,000	150,000	67	Français	75% ethanol 25% essence fossile (2022)
8	2030	WLTC	150,000	150,000	80	Français	75% ethanol 25% essence fossile (2022)
9	2030	WLTC	250,000	200,000	80	Français	75% ethanol 25% essence fossile (2022)
10	2030	WLTC	150,000	150,000	80	Européen	75% ethanol 25% essence fossile (2022)
11	2030	WLTC	150,000	150,000	85	Français	75% ethanol 25% essence fossile (2022)
12	2040	WLTC	250,000	250,000	90	Français	75% ethanol 25% essence fossile (2022)
13	2040	WLTC	250,000	250,000	95	Français	75% ethanol 25% essence fossile (2022)
14	2040	WLTC	250,000	250,000	90	Français	75% ethanol 12,5% essence fossile (2022) 12,5% E-gasoline
15	2040	WLTC	250,000	250,000	90	Français	75% ethanol 25% E-gasoline

### 3.3.1 Horizon temporel 2022

#### 3.3.1.1 Résultats principaux 2022

Pour l'horizon temporel 2022, on compare les émissions de GES des différentes motorisations évaluées sur plusieurs cycles de conduite : cycle WLTC (Figure 9), cycle urbain (Figure 10), cycle routier (Figure 11) et cycle autoroute (Figure 12). Une durée de vie de véhicule de 150,000 km est considérée. Une même durée de vie des batteries est considérée pour cet horizon temporel. En cycle WLTC, le PHEV E85 (en usage réel, 40% en électrique, 60% en thermique E85) et le véhicule électrique avec une batterie de capacité 60 kWh présentent les meilleurs résultats en termes d'émissions de GES. Le véhicule électrique émet moins d'impact lors de la phase d'utilisation mais la production de la batterie remonte les émissions au niveau du PHEV. L'utilisation de l'E85 permet globalement de réduire de deux fois les émissions de GES par rapport au véhicule essence. Pour les autres cycles de conduite, les mêmes tendances sont retrouvées. Cependant, on peut remarquer que le véhicule hybride rechargeable flex-E85 et le véhicule électrique sont les plus pertinents en usage urbain.

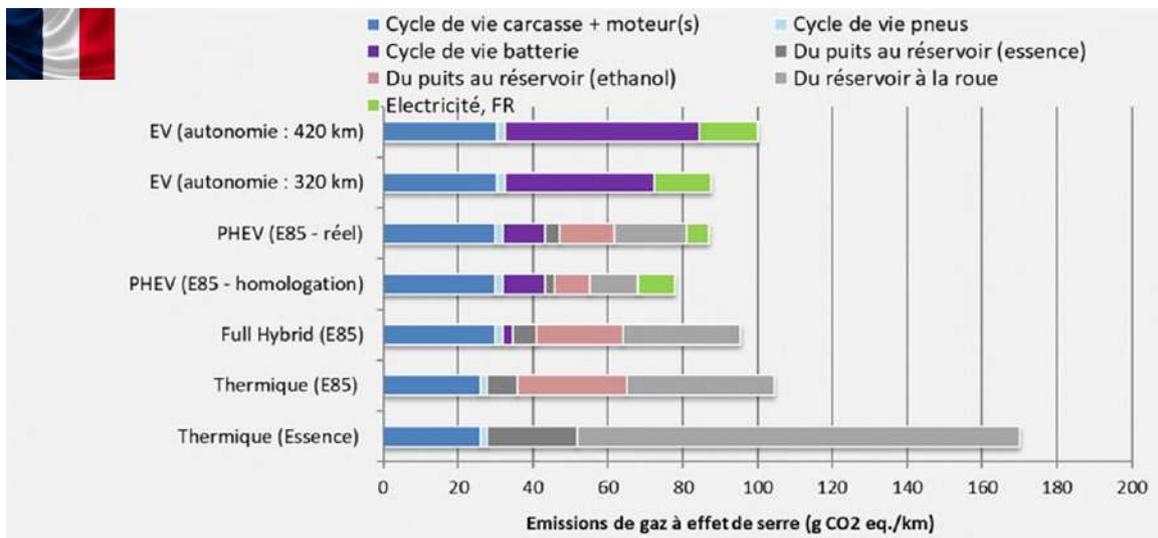


Figure 9 Résultats émissions de GES cycle WLTC horizon 2022 150,000 km

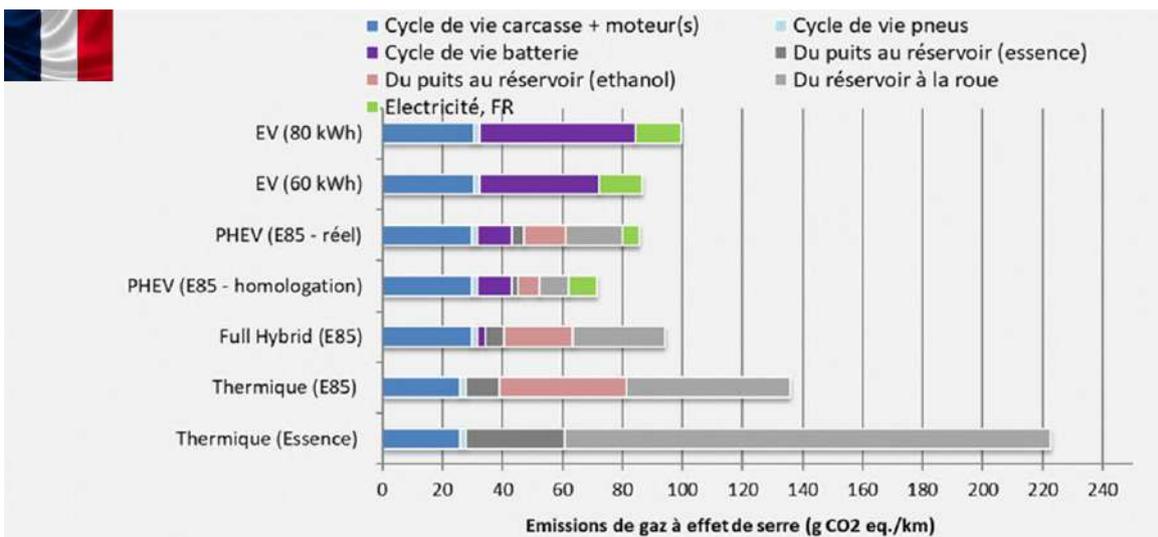


Figure 10 Résultats émissions de GES cycle urbain horizon 2022 150,000 km

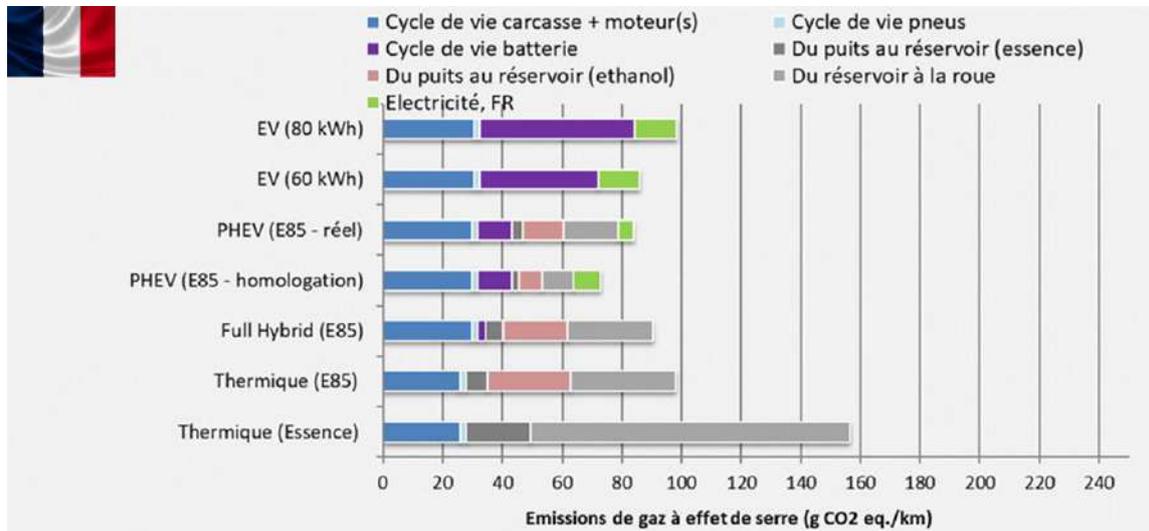


Figure 11 Résultats émissions de GES cycle extra-urbain horizon 2022 150,000 km

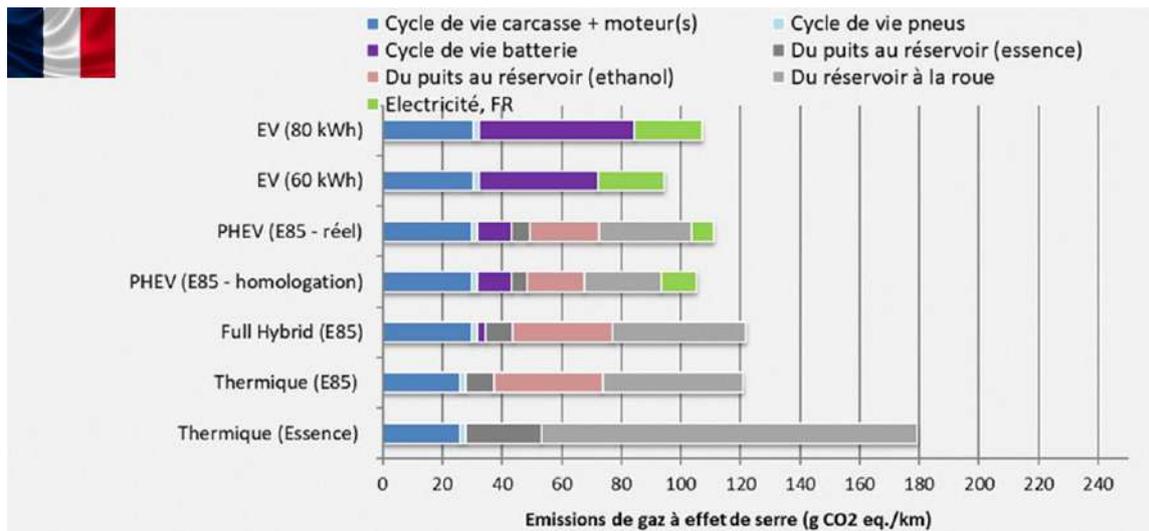


Figure 12 Résultats émissions de GES cycle autoroute horizon 2022 150,000 km

### 3.3.1.2 Analyse de sensibilité horizon 2022

- Mix électrique européen

Sur la Figure 13, le mix électrique français est remplacé par le mix électrique européen. Pour autant on conserve de l'éthanol français. Dans ce cas-là, les émissions liées à la production d'électricité sont beaucoup plus importantes et ce sont donc les véhicules thermique E85 et full-hybrid E85 qui sont les plus avantageux d'un point de vue du potentiel de réchauffement climatique.

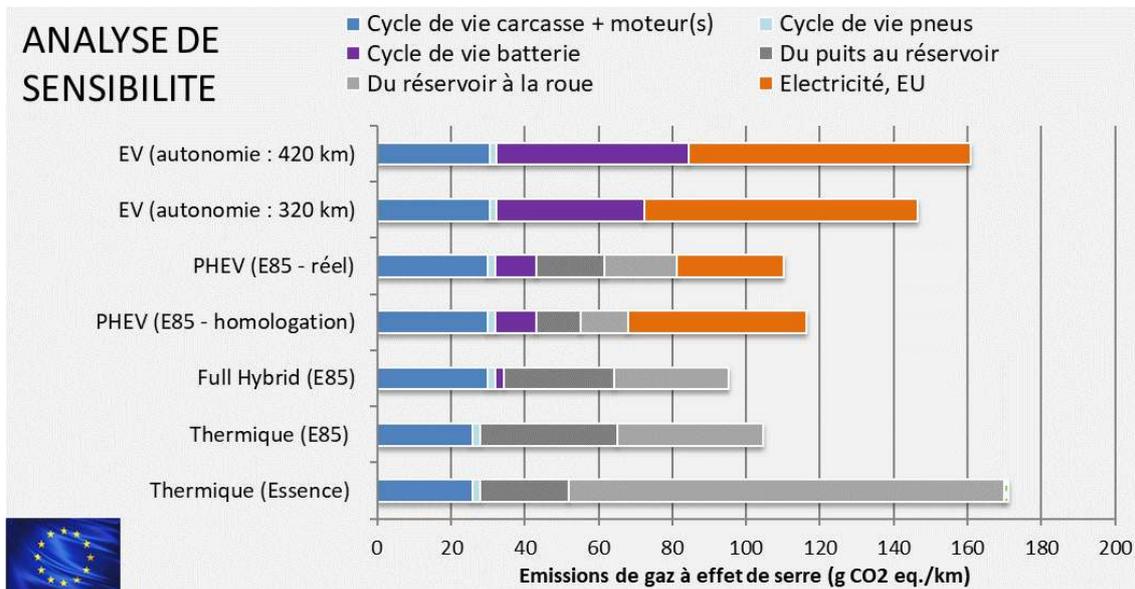


Figure 13 Résultats émissions de GES cycle WLTC horizon 2022 150,000 km avec mix électrique européen

- Augmentation du kilométrage

Sur la Figure 14, sont présentés les résultats dans le cas d'un scénario avec des durées de vie des véhicules et des batteries de 250,000 km, en cycle WLTC. Dans ce cas-là, les impacts de la batterie sont plus amortis et cela avantage donc les véhicules électriques qui présentent les émissions les plus faibles. Sur la Figure 15, on considère une durée de vie des batteries de 150,000 km ce qui permet de retrouver les tendances obtenues précédemment dans le cas d'une durée de vie des véhicules de 150,000 km.

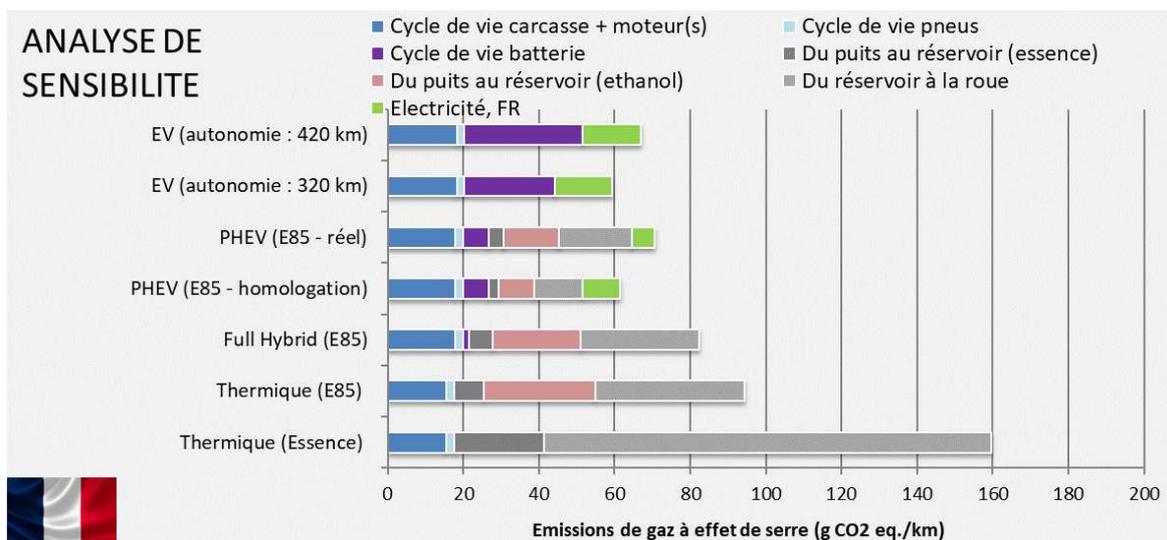


Figure 14 Résultats émissions de GES WLTC 2022 250,000 km durée de vie batterie : 250,000 km

## Direction Economie et Veille

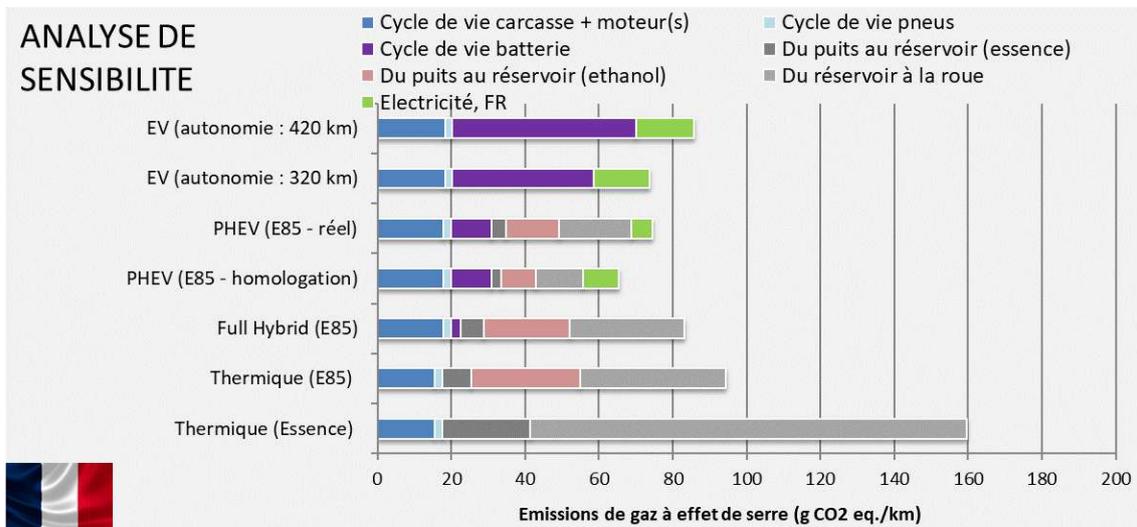


Figure 15 Résultats émissions de GES WLTC 2022 250,000 km durée de vie batterie : 150,000 km

### 3.3.2 Horizon temporel 2030

#### 3.3.2.1 Résultats principaux 2030

Sur la Figure 16, sont présentés les résultats à l'horizon 2030 pour une durée de vie des véhicules et des batteries de 150,000 km, en cycle WLTC. Dans ce cas, on considère une réduction des émissions de l'éthanol (en WtW) de 80% par rapport à la référence fossile (de 2022). Pour 2030, on considère aussi une augmentation de l'efficacité des moteurs et une baisse de la masse qui entraînent une diminution des consommations électriques ou de carburant. Ces hypothèses permettent de réduire les impacts des véhicules fonctionnant à l'E85 avec une valeur de 70 g CO<sub>2</sub>-eq/ km pour le PHEV (usage réel). En comparaison, le véhicule électrique (capacité de 60 kWh) bénéficie aussi d'une réduction de ses émissions de GES grâce à une amélioration du mix électrique français et une diminution des impacts de la production de la batterie. Il obtient une valeur de 72 g CO<sub>2</sub>-eq / km pour ses émissions de GES en cycle de vie.

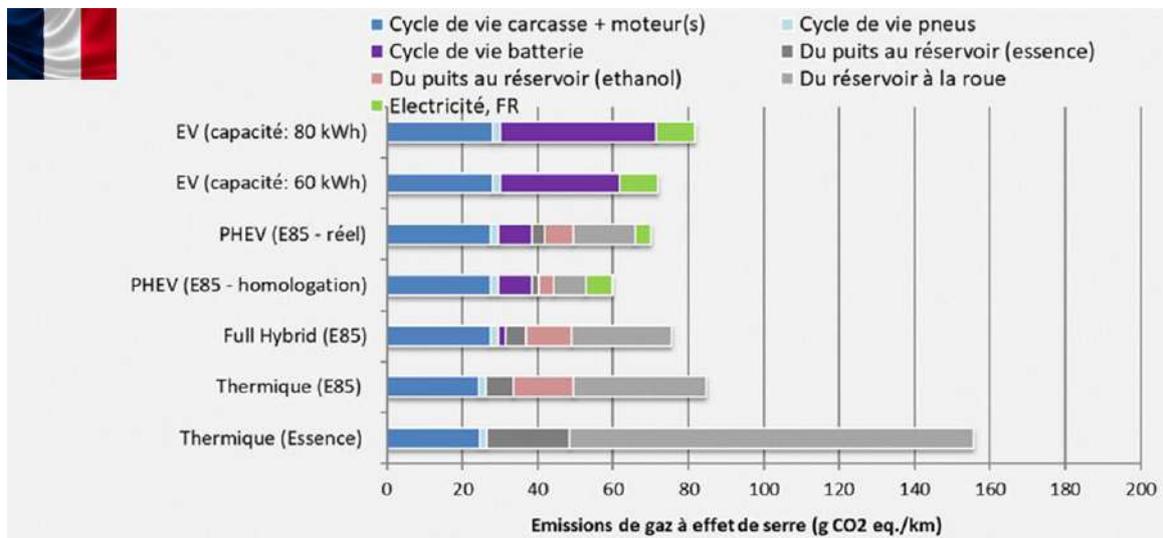


Figure 16 Résultats émissions de GES WLTC 2030 150,000 km

Sur la Figure 17, on retrouve les résultats dans le cas d'une durée de vie des véhicules de 250,000 km et d'une durée de vie des batteries de 200,000 km.

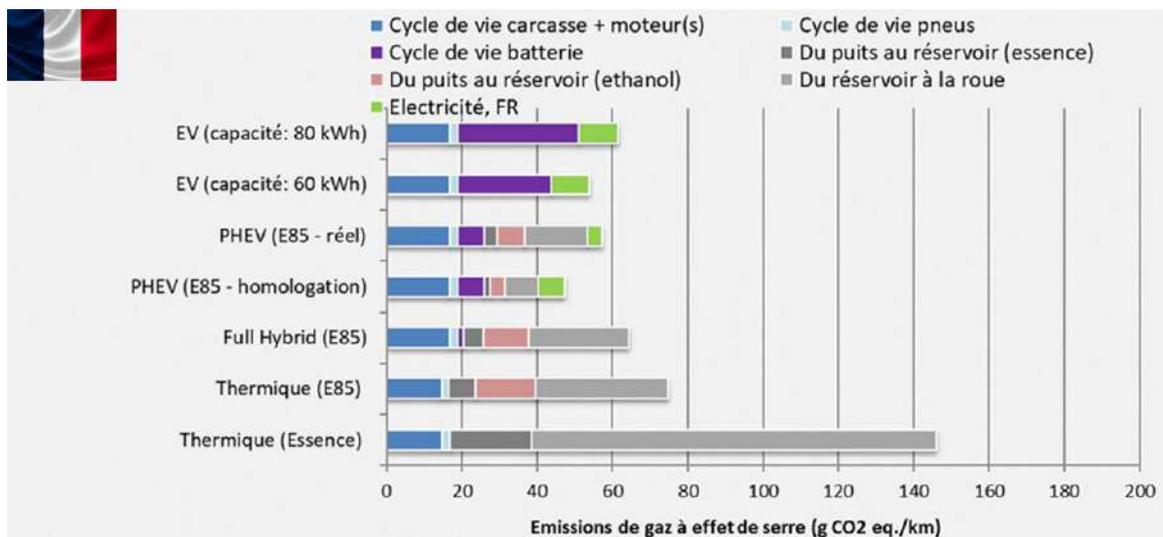


Figure 17 Résultats émissions de GES WLTC 2030 250,000 km durée de vie batterie : 200,000 km

### 3.3.2.2 Analyse de sensibilité 2030

- Mix électrique européen

Dans un premier temps, le mix électrique français de 2030 est remplacé par un mix électrique européen prospectif (Figure 18). Dans ce cas, on remarque que toutes les motorisations fonctionnant à l'E85 possèdent des émissions de GES similaires et nettement inférieures à celles des véhicules électriques.

## Direction Economie et Veille

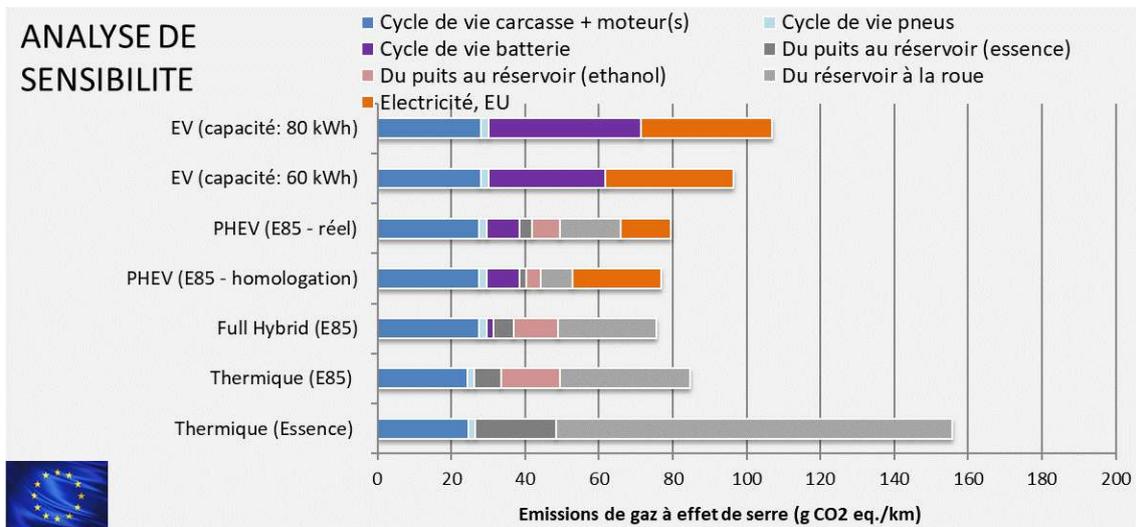


Figure 18 Résultats émissions de GES WLTC 2030 150,000 km Mix électrique européen

- Réduction des émissions de GES plus importante pour la fabrication du bioéthanol

Dans un second temps, le pourcentage de réduction des émissions de GES de l'éthanol est augmenté à 85% (au lieu de 80%) ce qui permet de montrer le potentiel de gain sur le cycle total engendré par cette diminution des impacts de production de l'éthanol (Figure 19).

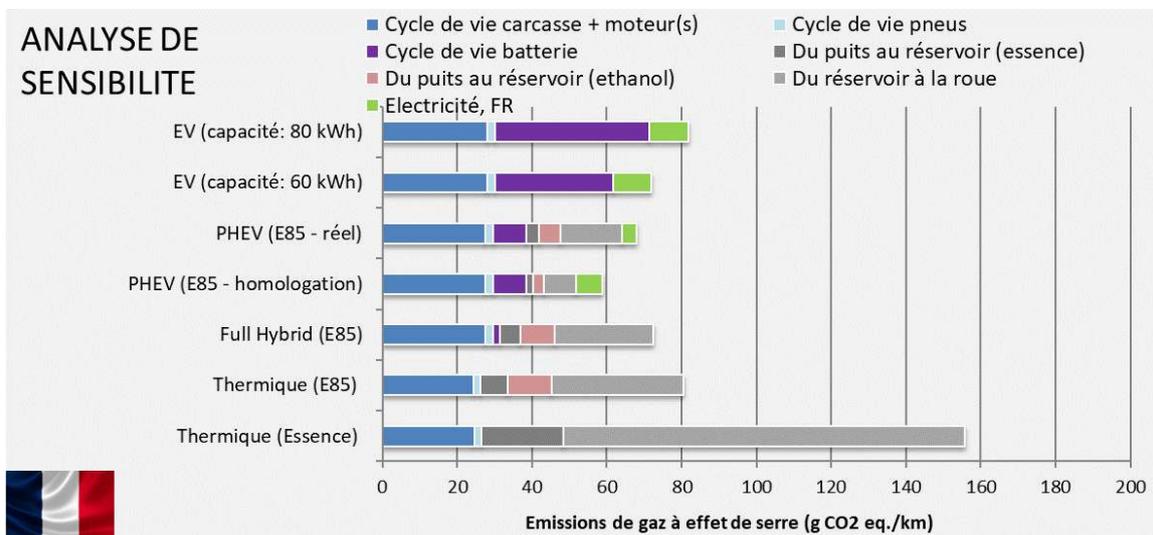


Figure 19 Résultats émissions de GES WLTC 2030 150,000 km 85% de réduction des GES pour l'éthanol

### 3.3.3 Horizon temporel 2040

#### 3.3.3.1 Résultats principaux 2040

Les résultats pour l'horizon temporel 2040 sont montrés sur la Figure 20. Pour cet horizon, on considère uniquement une durée de vie de véhicules et des batteries de 250,000 km, en cycle WLTC. Ce choix se justifie par l'amélioration de la technologie des batteries. On considère pour cet horizon une réduction des émissions de GES

## Direction Economie et Veille

de 90% pour la production d'éthanol en France. Dans l'E85, on considère toujours dans un premier temps 75% d'éthanol et 25% d'essence fossile (valeur horizon 2022). Pour 2040, le contenu carbone du mix électrique est réduit par rapport à 2030 (selon les scénarios RTE). De plus les émissions de GES liées à la production des batteries sont aussi réduites ce qui permet d'obtenir des émissions cycle de vie pour les véhicules électriques autour de 40 g CO<sub>2</sub>-eq / km. Après les véhicules électriques, le PHEV E85 (en usage réel) présente des émissions de GES relativement faibles autour de 46 g CO<sub>2</sub>-eq / km.

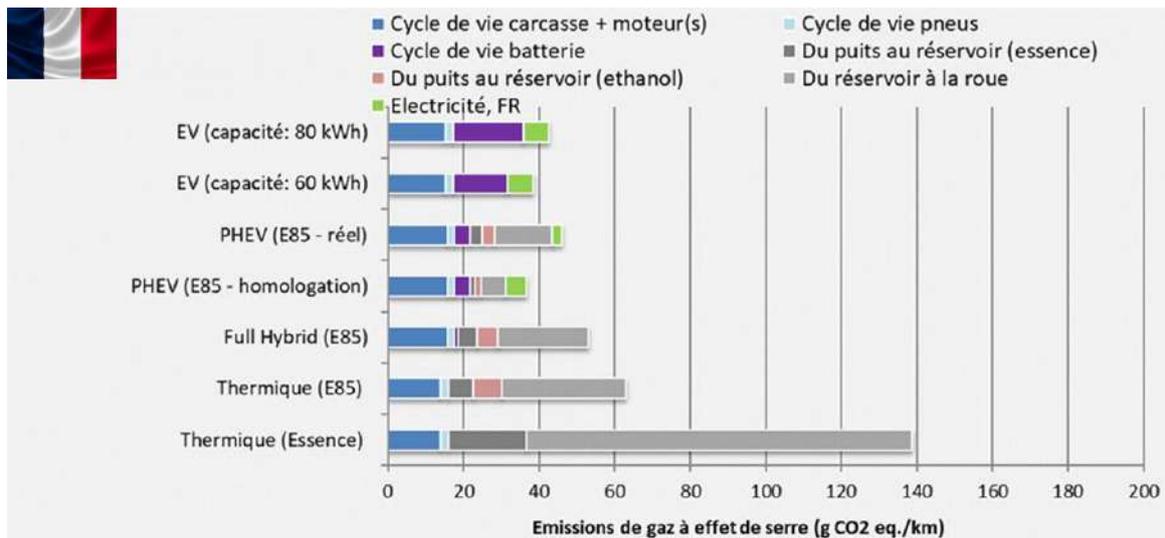


Figure 20 Résultats émissions de GES WLTC 2040 250,000 km durée de vie batterie : 250,000 km

### 3.3.3.2 Analyse de sensibilité 2040

- Réduction des émissions de GES plus importante pour la fabrication du bioéthanol

On fait évoluer le pourcentage de réduction des émissions de GES de l'éthanol à 95%, au lieu de 90% (Figure 21). Cela entraîne une réduction supplémentaire des impacts cycle de vie des véhicules fonctionnant à l'E85. On obtient dans ce cas des émissions de GES de 44 g CO<sub>2</sub>-eq / km pour le PHEV E85 (en usage réel).

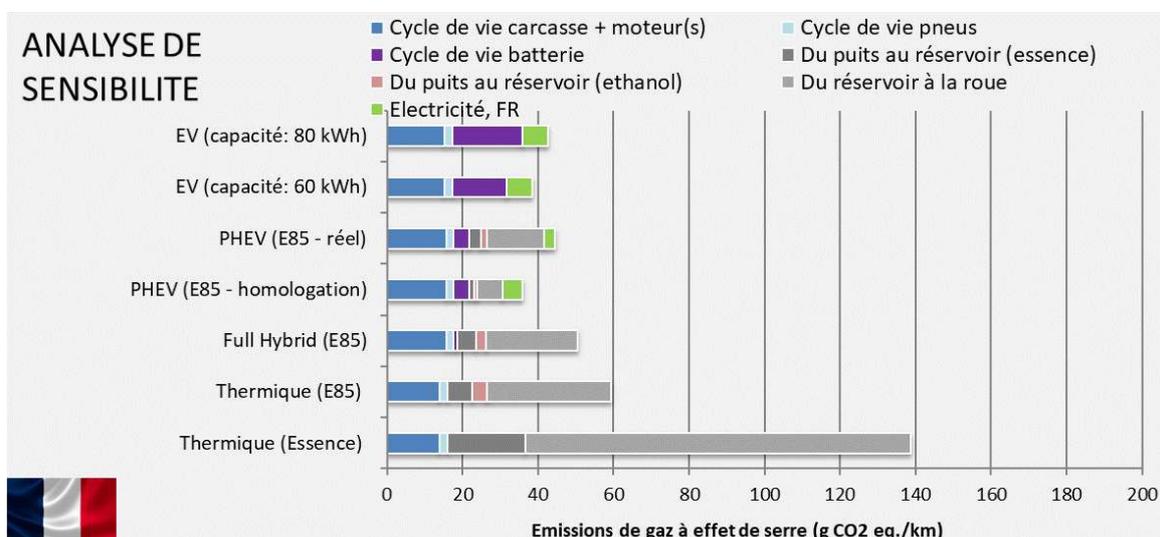


Figure 21 Résultats émissions de GES WLTC 2040 250,000 km 95% de réduction des GES pour l'éthanol

## Direction Economie et Veille

- Incorporation du e-gasoline dans l'E85

Enfin, une dernière analyse de sensibilité est réalisée pour laquelle l'essence fossile présente dans l'E85 (à hauteur de 25%) est remplacée dans un premier temps par un mélange de 50% d'e-gasoline et 50% d'essence fossile (2022). Cela permet une diminution supplémentaire des impacts de l'E85. Sur la Figure 22, on constate que les véhicules PHEV E85 et full-hybrid E85 ont des valeurs d'émissions de GES équivalentes à celles du véhicule électrique (capacité de 60 kWh). Dans un second temps, l'essence fossile est remplacée par uniquement de l'e-gasoline (Figure 23). Cela permet de diminuer les impacts des véhicules fonctionnant à l'E85 grâce notamment à la suppression des émissions à l'échappement liées à la combustion de l'essence fossile.

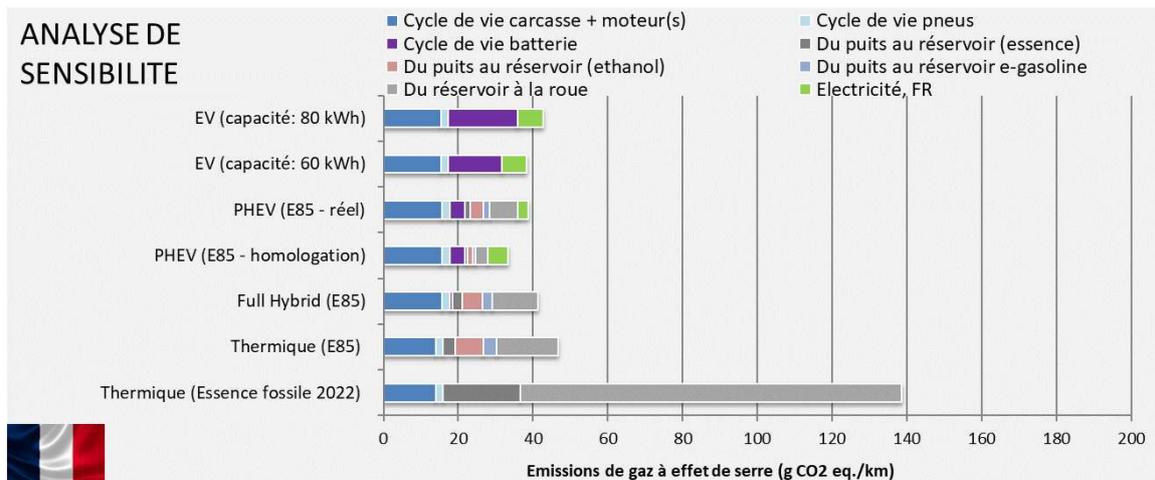


Figure 22 Résultats émissions de GES WLTC 2040 250,000 km avec introduction de 12,5% d'e-gasoline

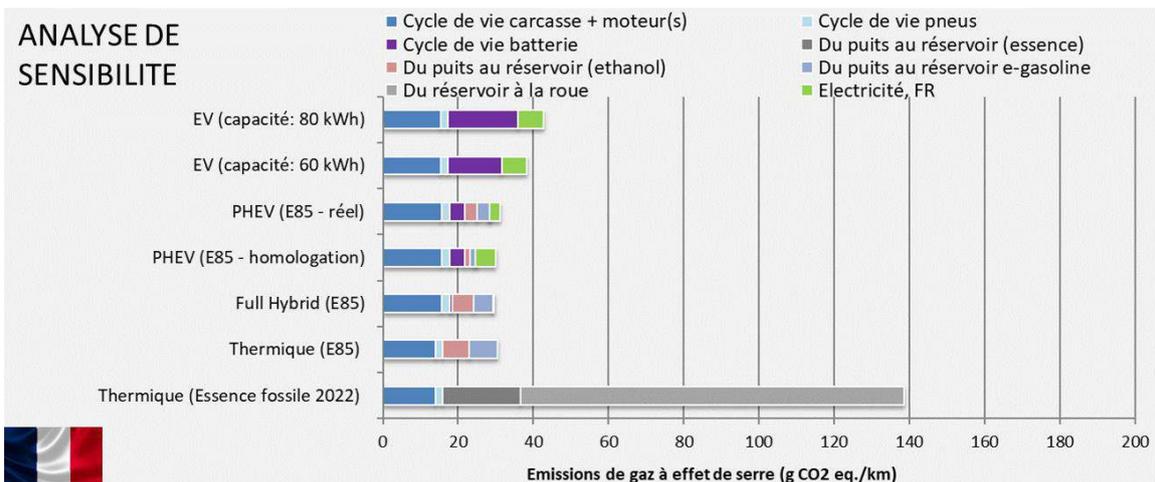


Figure 23 Résultats émissions de GES WLTC 2040 250,000 km avec introduction de 25% d'e-gasoline

## 4 Projection de la consommation d'éthanol dans le parc français

### 4.1 Introduction

Les calculs prospectifs de demande d'éthanol du parc de véhicules légers français, ont été réasiliés avec le modèle de parc automobile DRIVE<sup>RS</sup> (*DiscRete choice modeling for low-carbon VEhicles fleet scenaRioS*) développé par IFPEN.

En permettant d'étudier les dynamiques du marché des véhicules particuliers à l'horizon 2040 en France et en Europe, le modèle DRIVE<sup>RS</sup> vise à :

- Établir différents scénarios de ventes des véhicules, principalement électriques et thermiques ;
- Identifier les conditions et actions d'une large gamme d'instruments et de politiques publiques à mettre en œuvre pour développer une mobilité bas carbone ; dont électrique ;
- Évaluer les impacts de ces politiques sur les émissions polluantes (CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, PM10) du secteur du transport.

Le modèle est axé sur les comportements des individus en ce sens qu'il simule les modifications de comportement des consommateurs en réponse à un changement des conditions économiques. Il intègre :

- un modèle économétrique de demande de transport, permettant de projeter le stock de véhicules et les distances parcourues à l'horizon 2040 ;
- un modèle de choix discret, permettant de répartir la demande par types de véhicule (petit, moyen, gros) et par technologie (Diesel, Essence, E85, CNG, HEV essence, PHEV Essence, BEV, Hydrogène Pile à combustible). Il est à noter que la dénomination « Diesel » fait en fait référence aux motorisations thermiques Diesel et Mild Hybrides Diesel. De même la dénomination « essence » ou « gasoline » englobe les motorisations 100% thermiques essence et les Mild hybrid essence (Hybride48V).

Les consommations unitaires d'énergie des différents véhicules et leurs émissions polluantes sont ensuite déduites. Ces dernières s'appuient sur des valeurs calculées par IFPEN à partir de conditions réelles de conduite.

Cinq leviers permettent de décarboner le secteur du transport : la modération de la demande de transport, le report modal, l'optimisation du taux de remplissage, l'efficacité énergétique des véhicules, et l'intensité carbone de l'énergie (Figure 24).



Figure 24 : Leviers clés pour décarboner les transports, utilisés dans la décomposition des émissions (Bigo, 2020)

Le modèle DRIVE<sup>RS</sup>, permet d'analyser trois de ces cinq facteurs - l'amélioration de la performance énergétique des véhicules, la croissance de la demande ainsi que la décarbonation de l'énergie consommée par les véhicules – initialement à travers six types de politiques publiques différenciées<sup>5</sup>. Le modèle ne s'intéressant qu'aux véhicules

<sup>5</sup> Développement des points de charge, investissement en R&D sur les véhicules thermiques, prix de l'énergie, subventions à l'achat de véhicules électriques, taxe sur les carburants et taxe carbone.

## Direction Economie et Veille

particuliers, le report modal n'est pas étudié. De même il n'y a pas d'optimisation possible de l'utilisation des véhicules (taux de remplissage).

La structure du modèle DRIVE<sup>RS</sup> est présentée en Annexe B - Les hypothèses générales concernant les politiques publiques retenues et nécessaires pour effectuer les calculs, ainsi que les hypothèses propres concernant les véhicules flex-E85 résultant des échanges avec le SNPAA sont présentées dans les sous-sections suivantes. La dernière sous-section présente les résultats des calculs prospectifs.

## 4.2 Présentation des hypothèses générales retenues pour les modélisations

Nous présentons les différentes hypothèses considérées et formant par combinaison les différents scénarios de politiques publiques.

### 4.2.1 Présentation des scénarios

Dans le but d'établir une vision prospective de la flotte des véhicules particuliers en France, plusieurs scénarios ont été construits. Ils décrivent les différentes situations qui pourraient avoir lieu dans le pays sur les deux prochaines décennies, et qui potentiellement joueront un rôle sur le choix des acheteurs. Cette section décrit les scénarios utilisés pour estimer l'effet des politiques publiques qui visent à promouvoir les véhicules électrifiés. Ils s'appuient sur plusieurs sources académiques, sur des dires d'expert IFPEN ou encore sur des rapports de consultants.

Ainsi dans le cadre de l'étude ADEME E4T 2040, cinq *scénarios contextuels* et huit *scénarios de politique publique* ont été choisis : les six premiers, appelés *scénarios contextuels*, « agissent » plutôt sur l'offre tandis que les huit suivants « agissent » plutôt sur la demande.

La section 4.2.2 présente les cinq *scénarios contextuels* retenus pour générer les résultats du modèle. Chacun correspond à un *policy mix* de trois paramètres clefs dans les choix d'achat d'un véhicule neuf donné. La section 4.2.3 présente les huit *scénarios de politiques publiques* retenus. Il est à noter que ces derniers sont orthogonaux des cinq précédents.

### 4.2.2 Les scénarios contextuels

La Figure 25, récapitule les caractéristiques des cinq grands *scénarios contextuels* retenus.

Scenario n°	Développement des bornes de recharge	Prix des énergies fossiles élevé	Progrès important des moteurs thermiques
A	○		
B	○		○
C	○	○	
D	○	○	○
E			

Figure 25 : Ensemble des scénarios contextuels

Les trois paramètres contextuels sont détaillés ci-après :

#### Infrastructures de recharge

Même si le nombre de bornes de recharge n'est pas le seul critère qui détermine le choix de l'acheteur en faveur d'un véhicule électrique, il est clair que cet aspect joue un rôle important. La plupart des bornes de recharge en France sont des bornes domestiques dites « lentes », installées chez des particuliers. Cela suffit pour un usage

## Direction Economie et Veille

quotidien de son véhicule électrique : il est rechargé chaque soir et prêt à être utilisé le lendemain. Mais pour obtenir un développement important des ventes de VE, il est nécessaire d'avoir à l'échelle du pays un maillage relativement dense de bornes de recharge publiques, et notamment de recharges publiques rapides. Cela étendrait d'autant le périmètre d'utilisation des VE

### Prix de l'énergie

Il est important d'intégrer deux scénarios d'évolution du cours du baril de pétrole d'ici 2040. En effet cela influe directement sur le prix des carburants fossiles à la pompe, et donc sur le calcul du TCO qui sert de base au modèle pour définir le choix des acteurs économiques dans leurs décisions d'achat.

Plus globalement, l'augmentation des prix de l'énergie peut également entraîner une baisse globale de la demande de mobilité à travers un effet prix mais également revenu comme indiqué dans les équations (1) et (2).

Pour construire les scénarios, les projections de l'AIE ont été reprises. Le coût de production des différents carburants (essence et gazole) est calculé pour chacun des deux scénarios *sustainable development* et *stated policies*.

### Progrès techniques des moteurs thermiques

L'hypothèse de base prise pour les progrès techniques des moteurs thermiques s'appuie sur une amélioration relative des rendements (environ 15% de gain d'ici 2040), et donc une baisse progressive d'ici 2040 de la consommation de carburant (essence, gazole, E85 ou GNV). Il s'agit du scénario de base pour la plupart des simulations de cette étude. Cependant, un autre scénario a été construit, faisant l'hypothèse d'un progrès accru des moteurs thermiques d'ici 2040, porté par la volonté des constructeurs et équipementiers de donner un second souffle aux véhicules thermiques.

La Figure 26 illustre un exemple des consommations utilisées pour les deux scénarios envisagés. Dans le scénario de référence (REF) les progrès techniques permettent de faire baisser les consommations des moteurs thermiques de manière raisonnée et réaliste. Dans le scénario amélioré (AMELIORE) on peut voir que la baisse est plus prononcée.

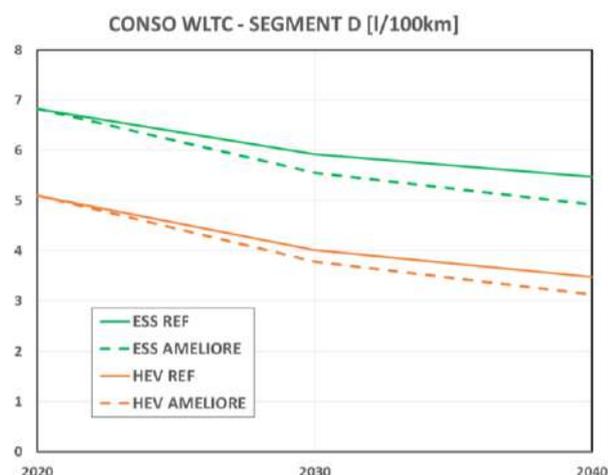


Figure 26 : Hypothèses de consommations en cycle urbain de véhicules moyenne gamme essence et Diesel

### 4.2.3 Les scénarios de politique publique

Cette section détaille les *scénarios de politiques publiques* retenus pour l'analyse. La Figure 27 récapitule les caractéristiques de ces scénarios.

Scenario n°	Aide à l'achat pour les VE	Taxe spécifique sur les carburants pétroliers	Taxe carbone élevée
1			
2			○
3		○	
4		○	○
5	○		
6	○		○
7	○	○	
8	○	○	○

Figure 27 : Ensemble des scénarios de politiques publiques

### 4.2.4 Arbres des Scénarios

Les scénarios contextuels et les scénarios de politiques publiques viennent d'être présentés. Ils sont utilisés dans les simulations pour i) établir quels sont les principaux leviers de déploiement de l'électrification du transport en France d'ici 2040 et ii) analyser les conséquences en termes de réduction des émissions polluantes de ce secteur.

Au total, la combinaison des cinq scénarios contextuels (A-E) et des huit scénarios de politique publique (1-8) génère 40 scénarios. Ces derniers sont construits selon une logique arborescente où toutes les dimensions de chaque branche sont croisées afin d'évaluer les effets combinés de ces différentes politiques, comme illustré par la Figure 28.

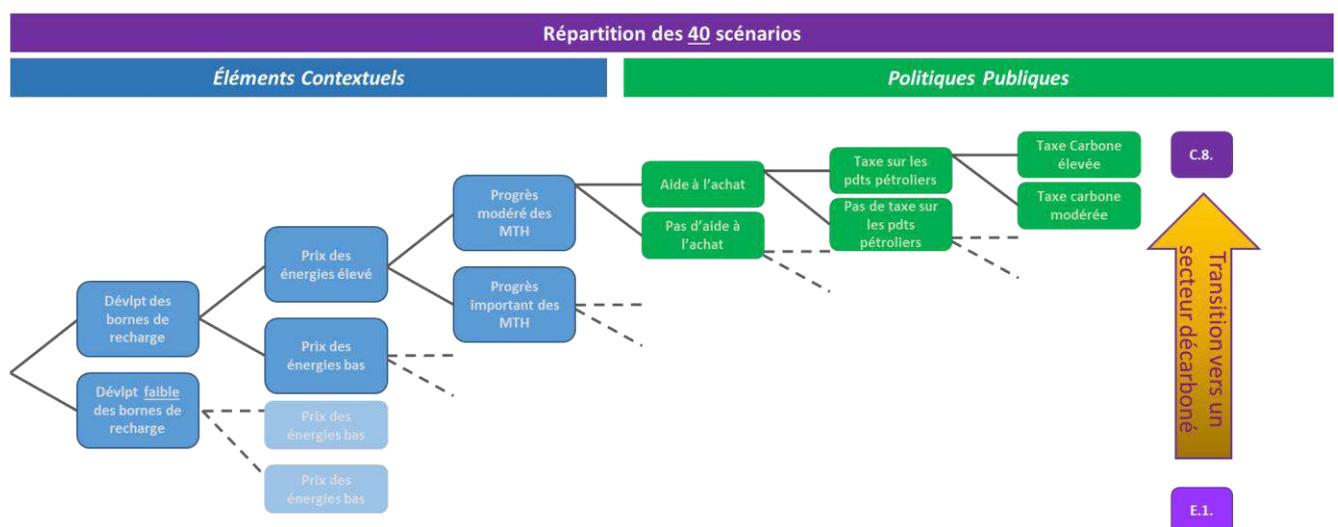


Figure 28 : Arbre des scénarios pour l'analyse du transport via DRIVE<sup>RS</sup>

### 4.3 Hypothèses spécifiques à l'étude de la demande d'éthanol

Dans sa configuration initiale qui vient d'être présentée, le modèle DRIVE<sup>RS</sup> et le jeu de scénarios de politiques publiques n'intègrent pas l'E85, et l'éthanol apparaît seulement comme la part biosourcée de l'essence. Des modifications du code de calcul ont donc été nécessaires pour gérer un carburant E85 et des véhicules flex-E85 ont été ajoutés à la base de données.

Au niveau du code de calcul :

## Direction Economie et Veille

- Définition d'un nouveau carburant E85
- Définition du cumul des consommations en éthanol (= E10 + E85)

Ainsi, la mise à jour de la base de données a consisté à définir :

- De nouveaux véhicules (CONVE85, HEVE85, PHEVE85)
- Pour chaque nouveau type de véhicule, des :
  - consommations
  - prix véhicules
- Un nouveau carburant E85

De plus, suivant les recommandations du SNPAA, nous avons fait l'hypothèse que les personnes achetant des véhicules flex-E85, ou faisant installer des boîtiers de conversion, sont des « gros rouleurs » parcourant une distance annuelle de 18 000 km/an.

### 4.4 Résumé des hypothèses retenues

L'Europe et a fortiori la France, affichent très clairement le souhait de développer les véhicules électriques. C'est pourquoi nous avons fait le choix de ne pas rejouer l'ensemble des quarante scénarios mais de limiter les calculs au groupe C des éléments contextuels (Figure 25) et aux deux scénarios de politiques publiques 1 et 8 (Figure 27). Le scénario C8 étant le scénario le plus favorable au déploiement des véhicules électriques.

De plus nous avons mené deux séries de modélisations, l'une maintenant la vente des véhicules thermiques neufs après 2035, et l'autre intégrant l'interdiction de vente des véhicules thermiques neufs en 2035, comme voté par le Parlement européen de Strasbourg début juin 2022. Aujourd'hui une ambiguïté subsiste quant à l'application de l'interdiction de vente aux véhicules plug-in hybrides. Nous avons fait le choix de considérer ces véhicules comme des véhicules électriques et de facto autoriser leur vente au-delà de 2035.

Le SNPAA nous a aussi fourni les historiques de consommation d'éthanol (éthanol pur et éthanol dans l'ETBE) par le parc français (Figure 29)

	2017	2018	2019	2020	2021
volumes Ethanol (Mhl)	8.90	9.69	11.54	10.42	12.97

Figure 29 : historiques de consommation d'éthanol du parc automobile français en million d'hectolitres

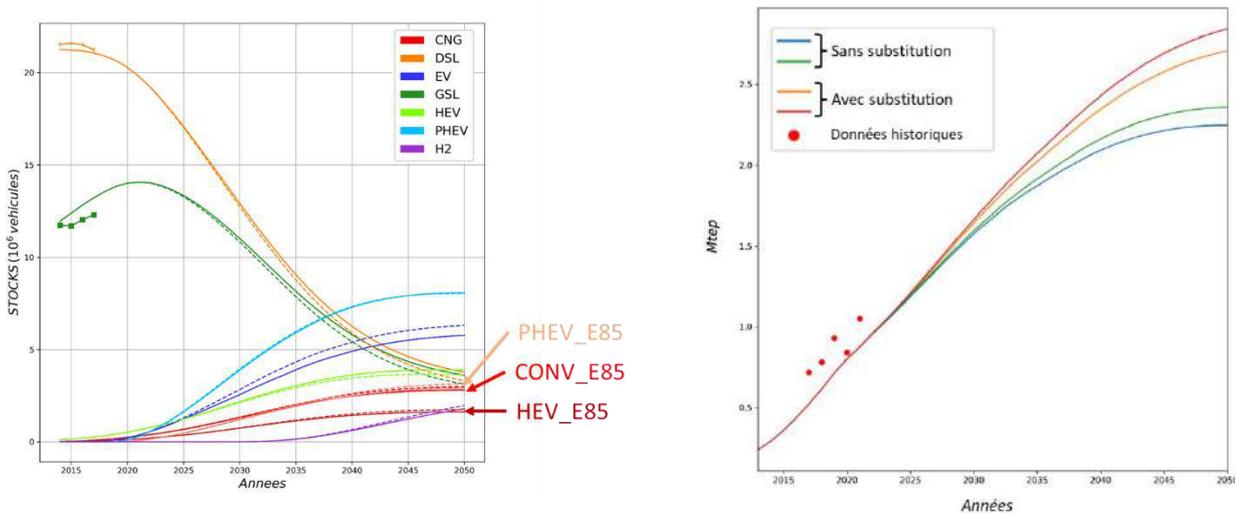
### 4.5 Résultats

La Figure 30 présente la composition du parc selon les scénarios C8 et C1 et sans interdiction de vente des véhicules thermiques à partir de 2035, ainsi que la consommation d'éthanol associée à ce parc. Sur la figure de gauche, on constate qu'en 2050, le parc français comportera environ 8 millions de véhicules flex-E85 et hybrides flex-E85, c'est-à-dire plus que de véhicules électriques (environ 6 millions) selon ces hypothèses. Le nombre de véhicules plug-in hybrides essence sera aussi d'environ 8 millions.

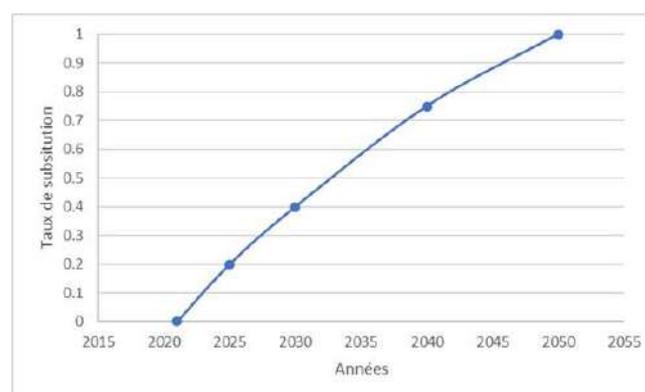
Sur la figure de droite, les consommations d'éthanol associées sont représentées (lignes bleue et verte). Les points rouges correspondent aux historiques de consommation d'éthanol (Figure 29). Nous constatons que les résultats des simulations sont légèrement inférieurs aux historiques, néanmoins la croissance de la consommation d'éthanol observée entre 2017 et 2021 est bien reproduite par les calculs, élément important qui traduit que la dynamique de pénétration des véhicules flex-E85 dans le parc français est elle aussi bien reproduite. Le fait que les consommations d'éthanol calculées sont légèrement inférieures à celles mesurées n'est pas un point alarmant en soit. Il s'explique au moins en partie par une utilisation d'E85 par des personnes possédant des véhicules thermiques essence ni flex-E85, ni muni d'un boîtier de conversion.

## Direction Economie et Veille

Selon les résultats présentés Figure 30 la consommation d'éthanol par le parc français de véhicules particuliers devrait doubler entre aujourd'hui et 2050 pour être légèrement supérieure à 2 Mtep en 2050. La Figure 30 présente aussi deux autres courbes (orange et rouge) de consommations supérieures d'éthanol. Ces dernières correspondent à la demande en éthanol si tous les véhicules essence, hybride essence et plug-in hybride essence disparaissaient à l'horizon 2050 et s'ils étaient remplacés par des véhicules flex-E85. Ce résultat répond à une demande du SNPAA et qui a pour objectif de reproduire une information transmise par le constructeur automobile FORD qui observe un plébiscite de ses véhicules flex-E85 au détriment de ses véhicules essence sur le premier semestre 2022. Pour rendre les calculs crédibles, nous avons substitué progressivement les véhicules essence par des motorisations flex-E85 selon la courbe présentée Figure 31.



**Figure 30 : évolution du parc de véhicules légers sans interdiction des moteurs thermiques en 2035 (à gauche), et évolution de la consommation d'éthanol associée (à droite)**



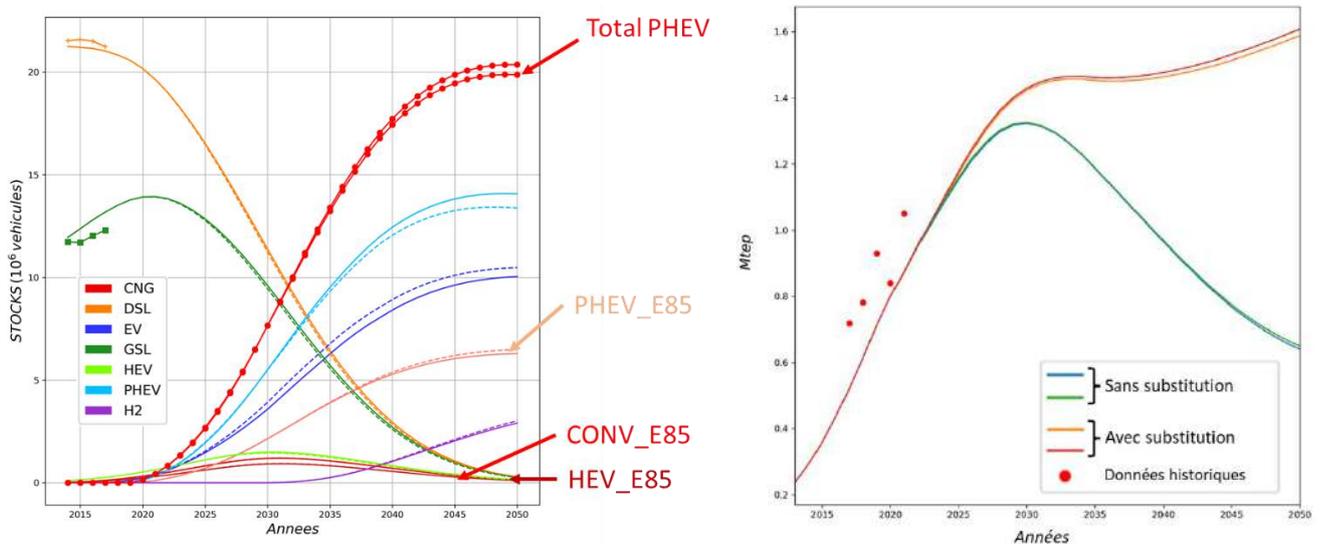
**Figure 31 : Hypothèse de courbe de substitution des véhicules essence (classiques, hybrides, plug-in hybrides) par leurs homologues flex-E85, s'ajoutant aux ventes de véhicules flex-E85 calculées à l'aide du code DRIVE<sup>RS</sup>**

La Figure 32 présente la composition du parc selon les scénarios C8 et C1 intégrant l'interdiction de vente des véhicules thermiques à partir de 2035, ainsi que la consommation d'éthanol associée à ce parc. Sur la figure de gauche, on constate que le parc de véhicules flex-E85 classique et hybride atteint un modeste sommet entre 2030 et 2035 pour disparaître en 2050. Il en est de même des véhicules hybride essence. Plus intéressant le parc de véhicules flex-E85 plug-in hybride croît jusqu'en 2050 pour atteindre environ 6 millions de véhicules. Dans ce

## Direction Economie et Veille

scénario la pénétration des véhicules électriques est beaucoup plus forte, en 2050 le parc comporterait selon ces hypothèses plus de 10 millions de véhicules électriques et environ 14 millions de véhicules plug-in hybride essence.

Sur la figure de droite, les consommations d'éthanol associées sont représentées (lignes bleue et verte). Elles présentent elles aussi un maximum entre 2030 et 2035 atteignant environ 1.3 Mtep et diminuent ensuite pour revenir au niveau des consommations observées historiquement en 2017. La forte diminution de la consommation d'éthanol s'explique par la disparition des véhicules essence. Comme précédemment, la Figure 32 présente aussi deux autres courbes (orange et rouge) de consommations supérieures d'éthanol. Dans ce scénario, le report des ventes de véhicules essence vers des véhicules flex-E85 se traduit par un plateau légèrement croissant de la demande de consommation d'éthanol entre 2035 et 2050 atteignant la valeur de 1.6 Mtep en 2050.



**Figure 32 : évolution du parc de véhicules légers avec interdiction des moteurs thermiques en 2035, et évolution de la consommation d'éthanol associée**

S

## 5 Conclusion

L'analyse du cycle de vie propose une méthodologie normée (ISO 14040 et 14044) qui fait consensus dès qu'il s'agit de déterminer les impacts environnementaux d'un produit ou d'un service. Une fois appliquée au véhicule léger, équipé de différentes technologies de groupe motopropulseur, l'ACV permet de réaliser des bilans (ici exclusivement GES) complets dits « du berceau à la tombe ». Par ce moyen, les émissions indirectes (i.e hors pot d'échappement) sont aussi comptabilisées dans les bilans, tout comme la captation du CO<sub>2</sub> lors de la croissance des plantes (on parle ici de CO<sub>2</sub> biogénique).

IFPEN a réalisé pour le compte du SNPAA, de l'AIBS et d'Intercéréales, une ACV de plusieurs véhicules de segment C : un véhicule thermique roulant au Superéthanol-E85 ou à l'essence fossile, un full-hybrid E85, un PHEV E85 en usage réel (40% électrique/60% E85), un PHEV E85 en usage homologation (70% électrique/ 30% E85), ainsi que deux véhicules électriques (1 avec une batterie de 60 kWh et 1 avec une batterie de 80 kWh). L'étude a aussi apporté une vision prospective, avec des horizons temporels 2030 et 2040.

À la suite des résultats de cette étude, plusieurs éléments de conclusion ou enseignements sont à souligner :

- En ce qui concerne le véhicule léger en France, l'utilisation d'un moteur hybride rechargeable alimenté exclusivement au Superéthanol-E85 est, en termes d'émissions de GES, au moins aussi performant que le véhicule électrique à batterie. Ceci est vrai pour une utilisation en usage réel de l'hybride rechargeable, c'est-à-dire 40% des kilomètres en mode tout électrique, et 60% en mode thermique.
- Sur un périmètre européen, avec un mix électrique plus carboné, l'hybride rechargeable E85 fait même mieux que le véhicule électrique à batterie.
- Il est à noter que l'hybridation simple (i.e sans possibilité de recharge sur le réseau, mais recharge uniquement lors des freinages) couplée au Superéthanol-E85 apporte déjà des gains très intéressants par rapport à une motorisation thermique 100% essence fossile.
- Si on considère un horizon de temps plus lointain, comme 2030 ou 2040, les technologies et le processus de fabrication des vecteurs énergétiques vont au global tous évoluer. Mais la solution hybride rechargeable E85 restera très intéressante d'un point de vue GES, sous réserve de maintenir les efforts sur la baisse des émissions de CO<sub>2</sub> liées à la production de bioéthanol.

## 6 Bibliographie

- (2020). Récupéré sur GREET: <https://greet.es.anl.gov/>
- ADEME. (2012). *Elaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions GES et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et thermiques.*
- ADEME. (2014). *Transport et logistique des déchets.*
- ADEME. (2020). *Analyse du cycle de vie relative à l'hydrogène.*
- ADEME. (2020). *Impact de l'utilisation d'éthanol à différentes teneurs dans le carburant (de E10 à E85) sur les performances moteur (consommation, CO2) et sur les émissions (PR et PNR) pour des véhicules Euro 6 équipés de boîtier E85 homologué ou flex-fuel d'origine.* Récupéré sur <https://bibliothèque.ademe.fr/air-et-bruit/4521-impact-de-l-utilisation-d-ethanol-a-differentes-teneurs-dans-le-carburant-de-e10-a-e85-sur-les-performances-moteur-consommation-co2-et-sur-les-emissions-pr-et-pnr-pour-des-vehicules-euro-6-equipés-de-boîtier-e85>
- Andre, M. (2004). Real-World Driving Cycles for Measuring Cars Pollutant Emissions—Part A: The ARTEMIS European Driving Cycles.
- CARBURE . (s.d.). Récupéré sur <https://carbure.beta.gouv.fr/app/>
- JRC, s. a. (2008). *Environmental Improvement of Passenger Cars (IMPRO-car).*
- Patrick Plötz, C. M. (2020). *Real-world usage of plug-in hybrid electric vehicles - Fuel consumption, electric driving, and CO2 emissions.*
- Prussi, M. Y. (2020). *JEC Well-To-Wheels report v5.* Récupéré sur <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC121213>
- reports, J. s. (2008). *Environmental Improvement of Passenger Cars (IMPRO-car).*
- Struben, J. and Sterman, J. (2008) 'Transition Challenges for Alternative Fuel Vehicle and Transportation Systems. *Environment and Planning B* 35(6), 1070-1097.'
- Train, K. E. (2009) 'Discrete choice methods with simulation. Cambridge University Press, Cambridge, 2nd edition.'

## Annexe A - Annexe

### 1. Table des figures

Figure 1 : Dimensionnements des groupes motopropulseurs des véhicules étudiés .....	6
Figure 2 : Modification de cartographie moteur pour représenter le passage d'un carburant E10 à un carburant Superéthanol-E85.....	7
Figure 3 : Hypothèses énergétiques des véhicules pour les horizons actuels et futurs.....	8
Figure 4 : Graphique représentant les consommations de carburant pour les différents types de véhicules (L/100km)* .....	10
Figure 5 : Graphique représentant les consommations énergétiques des différents types de véhicules (kWh/100km) .....	11
Figure 6 : Etapes considérées dans le périmètre WtW incluant le cycle de vie véhicule .....	13
Figure 7 : Répartition des matières premières utilisées en France pour la production d'éthanol .....	17
Figure 8 Réduction des émissions de GES pour l'éthanol européen .....	19
Figure 9 Résultats émissions de GES cycle WLTC horizon 2022 150,000 km .....	22
Figure 10 Résultats émissions de GES cycle urbain horizon 2022 150,000 km .....	22
Figure 11 Résultats émissions de GES cycle extra-urbain horizon 2022 150,000 km .....	23
Figure 12 Résultats émissions de GES cycle autoroute horizon 2022 150,000 km .....	23
Figure 13 Résultats émissions de GES cycle WLTC horizon 2022 150,000 km avec mix électrique européen .....	24
Figure 14 Résultats émissions de GES WLTC 2022 250,000 km durée de vie batterie : 250,000 km .....	24
Figure 15 Résultats émissions de GES WLTC 2022 250,000 km durée de vie batterie : 150,000 km .....	25
Figure 16 Résultats émissions de GES WLTC 2030 150,000 km.....	26
Figure 17 Résultats émissions de GES WLTC 2030 250,000 km durée de vie batterie : 200,000 km .....	26
Figure 18 Résultats émissions de GES WLTC 2030 150,000 km Mix électrique européen.....	27
Figure 19 Résultats émissions de GES WLTC 2030 150,000 km 85% de réduction des GES pour l'éthanol .....	27
Figure 20 Résultats émissions de GES WLTC 2040 250,000 km durée de vie batterie : 250,000 km .....	28
Figure 21 Résultats émissions de GES WLTC 2040 250,000 km 95% de réduction des GES pour l'éthanol .....	28
Figure 22 Résultats émissions de GES WLTC 2040 250,000 km avec introduction de 12,5% d'e-gasoline.....	29
Figure 23 : Leviers clés pour décarboner les transports, utilisés dans la décomposition des émissions (Bigo, 2020) .....	30
Figure 24 : Ensemble des scénarios contextuels.....	31
Figure 25 : Hypothèses de consommations en cycle urbain de véhicules moyenne gamme essence et Diesel.....	32
Figure 26 : Ensemble des scénarios de politiques publiques .....	33
Figure 27 : Arbre des scénarios pour l'analyse du transport via DRIVE <sup>RS</sup> .....	33
Figure 28 : historiques de consommation d'éthanol du parc automobile français en million d'hectolitres .....	34
Figure 29 : évolution du parc de véhicules légers sans interdiction des moteurs thermiques en 2035 (à gauche), et évolution de la consommation d'éthanol associée (à droite) .....	35
Figure 30 : Hypothèse de courbe de substitution des véhicules essence (classiques, hybrides, plug-in hybrides) par leurs homologues flex-E85, s'ajoutant aux ventes de véhicules flex-E85 calculées à l'aide du code DRIVE <sup>RS</sup> .....	35
Figure 31 : évolution du parc de véhicules légers avec interdiction des moteurs thermiques en 2035, et évolution de la consommation d'éthanol associée .....	36
Figure 32 : Schéma fonctionnel des entrées-sorties du modèle DRIVE <sup>RS</sup> .....	40
Figure 33 : Schéma bilan de l'organisation des calculs pour chaque pas de temps .....	41
Figure 34 : le modèle logit multinomial emboîté.....	43

## Annexe B -

### Présentation de la structure du modèle DRIVE<sup>RS</sup>

Le modèle DRIVE<sup>RS</sup> prend en compte un certain nombre de paramètres et de données en entrée, voir Figure 33. Il permet d'obtenir notamment, l'évolution du nombre de véhicules vendus par année et par technologie, la composition du parc par année et par technologie mais aussi tout un ensemble d'indicateurs environnementaux (émission de CO<sub>2</sub>, ...) dudit parc.

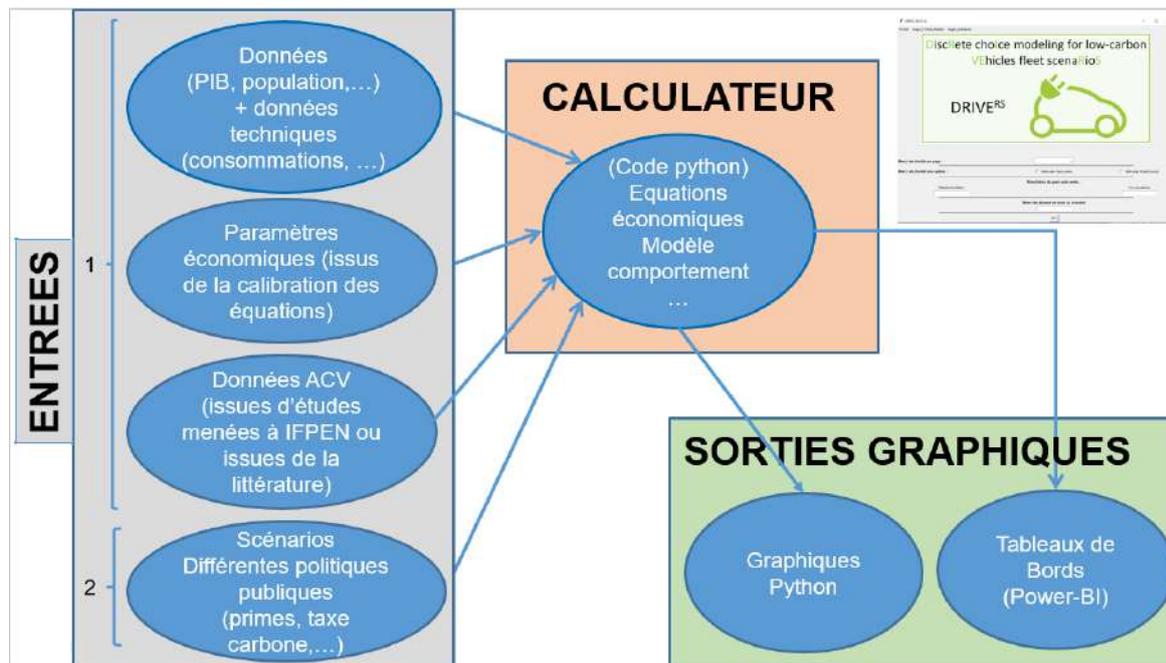


Figure 33 : Schéma fonctionnel des entrées-sorties du modèle DRIVE<sup>RS</sup>

Le modèle DRIVE<sup>RS</sup> se décompose en deux modules.

Le premier module permet de réaliser des projections à l'horizon 2040, par année, de la demande de transport routier. Celle-ci est exprimée soit en nombre total de véhicules soit en nombre total de kilomètres parcourus, à chaque fois sans distinction de type de véhicule ou de technologie.

Le second module consiste en un modèle de choix discret (voir par exemple Train (2009)) qui permet de répartir pour chaque année les nouvelles ventes entre les différents types de véhicules existants, i.e. par type de voitures et de technologie. Au préalable, les nouvelles ventes ont été obtenues en soustrayant à la demande totale de stock de véhicules « projetée » à l'année  $t$  le stock restant de véhicules une fois retirés les véhicules mis à la casse<sup>6</sup>.

Ce type de modélisation de la demande de transport par des modèles de choix discret est relativement courant dans la littérature<sup>7</sup>. La structure du modèle DRIVE<sup>RS</sup> repose ainsi largement sur celle du modèle TREMOVE (De Ceuster et al., 2007). Elle est résumée dans la Figure 34 dont chacun des points a, b, c, d et e est détaillé dans la suite.

<sup>6</sup> Comme nous le verrons ci-après, des lois de survies sont appliquées par type de technologie pour obtenir ce stock restant de véhicules.

<sup>7</sup> Le lecteur intéressé pourra consulter les ouvrages de référence suivant : Ben-Akiva, et Lerman (2000), Hensher et al. (2005), Koppelman et Bhat (2006).

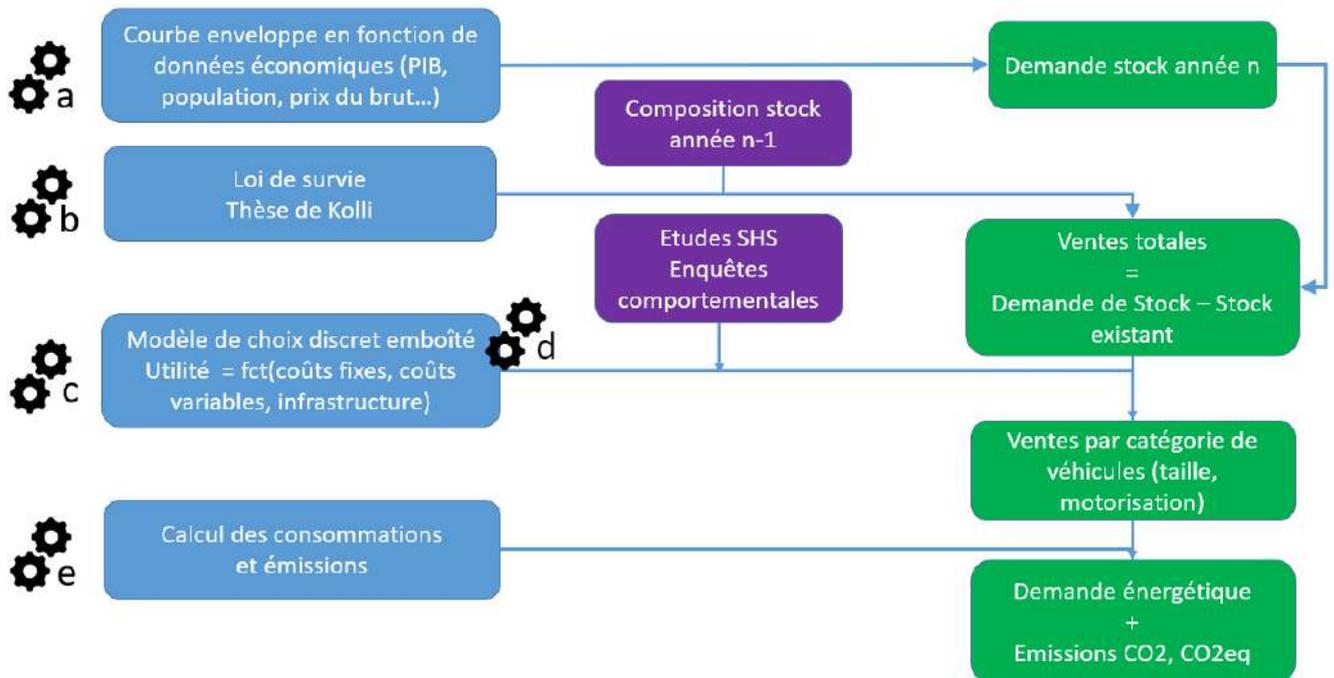


Figure 34 : Schéma bilan de l'organisation des calculs pour chaque pas de temps

### Projection de la demande de transport routier

Cette partie décrit comment sont obtenues les projections de la demande de transport à l'horizon 2050. Deux mesures de cette demande de mobilité sont retenues : le stock total de véhicules et le nombre total de kilomètres parcourus. Ces projections sont issues d'un modèle économétrique, il s'agit donc d'un modèle de simulation de projection de la demande de transport. Une fois ces demandes obtenues pour chaque pas de temps, les niveaux de ventes totales de véhicules par année sont déduits.

### Le stock total de véhicules et les kilomètres parcourus

Les projections de la demande de transport sont réalisées à partir de modèles économétriques estimant et quantifiant l'influence des principaux déterminants de la demande de transport sur le nombre total de kilomètres parcourus et le stock total de véhicules. Ces modèles estiment à partir de données historiques la relation entre la demande de transport à la date  $t$  et un certain nombre de variables exogènes dont la demande de transport passée ( $t-1$ ,  $t-2$ ). Ces variables sont exprimées en termes de taux de croissance pour  $i$ ) pouvoir faciliter les interprétations en estimant directement des élasticités  $ii$ ) et s'assurer qu'on travaille bien sur des séries temporelles stationnaires au sens statistique du terme.

L'équation (1) spécifie la relation entre le nombre total de kilomètres parcourus dans le pays  $c$  considéré avec ses principaux déterminants :

$$VKM_{c,t} = \vartheta_c VKM_{c,t-1} \left( \frac{VKM_{c,t-1}}{VKM_{c,t-2}} \right)^{\vartheta_{g(c)}^{VKM}} \left( \frac{PGAS_{c,t}}{PGAS_{c,t-1}} \right)^{\vartheta_{g(c)}^{PGAS}} \left( \frac{GDPP_{c,t}}{GDPP_{c,t-1}} \right)^{\vartheta_{g(c)}^{GDPP}} \left( \frac{RI_{c,t}}{RI_{c,t-1}} \right)^{\vartheta_{g(c)}^{RI}} \quad (1)$$

Où  $VKM$ ,  $PGAS$ ,  $GDPP$  et  $RI$  représentent les « véhicules kilomètres annuels », le « prix de l'essence », le « PIB par tête », et un « indice de développement des infrastructures routières », respectivement.

De manière similaire, l'équation reliant le stock total de véhicules à ses principaux déterminants est spécifiée comme suit :

## Direction Economie et Veille

$$ST_{c,t} = \alpha_c ST_{c,t-1} \left( \frac{ST_{c,t-1}}{ST_{c,t-2}} \right)^{\sigma_{g(c)}^{ST}} \left( \frac{PGAS_{c,t}}{PGAS_{c,t-1}} \right)^{\sigma_{g(c)}^{PGAS}} \left( \frac{GDPP_{c,t}}{GDPP_{c,t-1}} \right)^{\sigma_{g(c)}^{GDPP}} \quad (2)$$

Où  $ST$  correspond au « stock total de véhicules ».

### Loi de survie des véhicules et nouvelles ventes

Une fois le stock total de véhicules projeté pour chaque année jusqu'en 2040, il faut retirer les véhicules qui partent à la casse « naturellement » (accidents, voitures trop anciennes, etc.). Pour ce faire, et comme classiquement réalisé dans la littérature, une loi de survie est appliquée au stock total de véhicules. Ainsi, pour chaque technologie,  $j \in K$ , et pour chaque vintage  $v \in V$ , le « stock total restant de véhicules »  $SU$  à la date  $t$  est défini comme suit :

$$SU_{j,v,c,t} = SA_{j,v,c} e^{-\left( \frac{\beta_{j,c} + (t-v)}{\theta_{j,c}} \right)^{\beta_{j,c}}} \quad (3)$$

Avec  $SA$  représentant les ventes annuelles de la technologie  $j$ , du vintage  $v$  pour le pays  $c$  à la date  $t$ . La loi de survie retenue correspond à la fonction de survie de Weibull : avec  $\beta_{j,c}$  le paramètre de forme et  $\theta_{j,c}$  le paramètre d'échelle de la distribution. Les valeurs retenues pour ces deux paramètres sont issues du travail de thèse de Kolli (2012) qui a estimé ces paramètres sur les données de parcs françaises.

Dès lors, le « nombre total de nouvelles ventes nécessaire »  $TSA$ , est déduit en soustrayant à la demande totale de stock de véhicules « projetée » à l'année  $t$  le stock restant de véhicules.

$$TSA_{c,t} = ST_{c,t} - \sum_{j \in K} \sum_{v=t-30}^t (SU_{j,v,c,t}) \quad (4)$$

### Comment déterminer les ventes par type de véhicule dans le futur ? Un modèle de choix discret emboîté

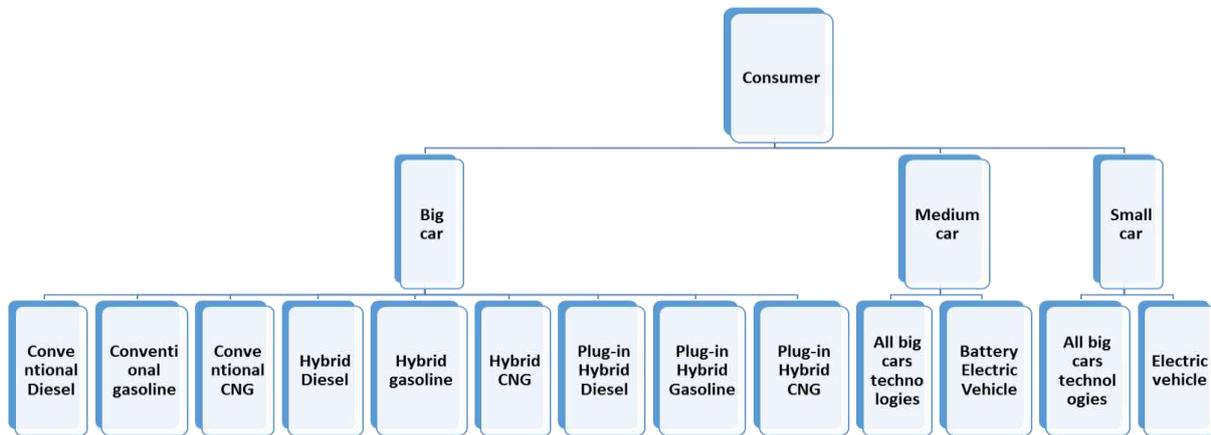
Une fois le nombre total de nouvelles ventes calculé par année, il faut maintenant déterminer la répartition de ces ventes par type de véhicules et de motorisation. Le secteur du transport est en pleine mutation avec, par exemple, l'arrivée de nouvelles technologies – au premier rang desquelles figurent bien-sûr les véhicules électriques – et la remise en question parfois très rapide – on pense ici au « *Diesalgate* » – de certaines technologies pourtant bien installées il y a encore dix ans. Dans ce contexte, on ne peut donc pas modéliser la demande à venir de nouvelles voitures électriques ou thermiques en « tirant le trait », c'est-à-dire en faisant simplement l'hypothèse que les comportements d'achat futurs seront les mêmes que ceux observés dans le passé. Ne serait-ce que parce que l'offre de voitures électriques commence seulement à émerger sur le marché.

Pour modéliser ces comportements d'achats futurs, le choix est fait de s'appuyer sur la littérature des modèles de choix discret (Train, 2009). Pour schématiser, cette littérature s'attache à expliquer les comportements de choix des agents économiques lorsqu'ils sont confrontés à un choix multimodal, *i.e.* comportant plusieurs alternatives. L'utilisation de ces modèles pour représenter les comportements dans les domaines du transport ou de la mobilité est particulièrement justifiée en ce sens que ces biens (moyen de transport ou de mobilité) ne sont pas demandés pour eux-mêmes mais pour répondre à une demande de service : se rendre d'un point A à un point B. Pour faire un trajet donné, un individu a le choix entre plusieurs options/modalités. Le mode de déplacement choisi (à pied, à vélo, en voiture, en transport en commun, etc.) sera celui qui lui apportera le plus de satisfaction parmi toutes les alternatives disponibles, compte tenu de ses préférences et de sa contrainte budgétaire.

L'hypothèse faite est que la décision d'achat d'un nouveau véhicule repose sur la comparaison des niveaux de satisfaction apportés par chaque type de véhicule disponible (thermique ou électrique). Le véhicule acheté sera celui qui apporte à l'agent économique la plus grande satisfaction, mesurée par une fonction d'utilité, eu égard à l'usage qu'il en attend. Le modèle de choix discret retenu ici est un modèle logit multinomial emboîté dans lequel le consommateur achète sa voiture en choisissant d'abord le type de véhicule désiré (petit, moyen, gros) avant de déterminer le type de technologie de propulsion (Diesel, essence, flex-E85, CNG, HEV essence, hybride CNG, PHEV

## Direction Economie et Veille

essence, BEV, hydrogène) qui lui convient le mieux. Les arbres de décision sont souvent utilisés pour décrire la structure des modèles emboîtés. La Figure 35 résume la spécification du modèle logit multinomial retenue ici :



**Figure 35 : le modèle logit multinomial emboîté**

Ce choix est effectué en comparant les coûts respectifs des différents véhicules disponibles à la vente. On peut montrer (Cf. Train, 2009 pour une démonstration formelle) qu'avec une formulation de type logit multinomial, la probabilité de choisir l'alternative  $j$ , ici un véhicule caractérisé par (sa taille et) son mode de propulsion, parmi l'ensemble de choix possibles  $K$  à la date  $t$  s'écrit comme suit :

$$Pr_{j,c,t} = \frac{e^{U_{j,c,t}}}{\sum_{k \in K} e^{U_{k,c,t}}} \quad (12)$$

D'après l'expression (12), cette probabilité dépend du TCO procuré par l'alternative  $j$ , noté  $U_{j,c,t}$ , comparé à l'ensemble des TCO de toutes les alternatives possibles ; soit, formellement, rapporté à la somme des TCO de toutes les alternatives possibles.

Ce choix, ou cette probabilité, ne dépend pas seulement de la comparaison rationnelle – au sens économique du terme – des TCO des véhicules mais également i) de leurs caractéristiques techniques ii) ainsi que, pour les technologies en rupture, de leurs modes de diffusion. Comme proposé par Struben and Sterman (2008) ou MacManus and Santer, (2009), le modèle logit multinomial emboîté développé ici intègre en plus un modèle simple de diffusion (Bass, 1969) pour mieux modéliser les taux de pénétration des nouvelles technologies (EVs, PHEVs, hydrogène, etc.). Ce modèle de Bass (1969) traite de l'adoption de nouveaux produits et/ou technologies, et de leur diffusion auprès des consommateurs, alors même qu'ils se caractérisent par des coûts de production et donc des prix d'achats élevés<sup>8</sup>.

### Calcul des consommations de carburants et des impacts environnementaux

Une fois les ventes calculées et réparties, on obtient la composition du parc sur l'intervalle de temps de l'étude. On en déduit ensuite les consommations de carburant (gazole, essence, E85, GNV, électricité, hydrogène) à l'échelle du parc et, finalement, les émissions de CO<sub>2</sub>, CO, NOx et particules fines correspondantes. Pour ce faire, on distingue pour chaque type de véhicules des consommations (L/100km) représentatives d'un cycle « Urbain » correspondant à une conduite petite distance, et d'un cycle « autoroute » représentatif d'une conduite longue distance. Le modèle prend ensuite en compte une répartition différente entre ces courtes et longues distances, suivant le segment du véhicule (plus de courte distance pour une citadine par exemple).

<sup>8</sup> On peut penser par exemple aux premiers postes de télévision ou aux premiers smartphones.