

ÉTUDE COMPARATIVE DE L'IMPACT CARBONE DE L'OFFRE DE VÉHICULES



Scoter, voiturette, vélo, vélo à assistance électrique, engin de déplacement personnel, marche, train, téléphérique, tramway, métro, autocar, bus urbain, moto, véhicule utilitaire léger, voiture : ce sont ces véhicules qui sont aujourd'hui utilisés par les Français au quotidien.

Cette étude en donne les caractéristiques clés et décrit leurs systèmes techniques supports, pour éclairer le débat sur les systèmes de mobilité bas carbone.

Étude pilotée par Nicolas Raillard
pour le think tank *The Shift Project*

FÉVRIER 2020 (V1)

**THE SHIFT
PROJECT**
THE CARBON TRANSITION THINK TANK

Crédit photo de couverture : Andrew Slifkin

ÉDITO – La technologie va-t-elle « sauver » le climat ?

C'est dans le domaine des transports que la question est aujourd'hui la plus pressante, et qu'elle suscite peut-être l'espoir le plus grand. La présente étude apporte des éléments de réponse à cette question, à l'aune des objectifs que la France s'est fixés, objectifs désormais entérinés par la Stratégie nationale bas carbone (SNBC).

La réponse du *Shift Project* : « A coup sûr, pas à elle seule ! » Et peut-être loin s'en faut, si l'on examine avec prudence les nombreux obstacles possibles – physiques, technologiques, économiques et sociétaux – qui se dessinent sur la longue route de l'émergence d'une mobilité basée sur 100 % de véhicules électriques ou bas carbone.

La même réponse préside à la démarche du « Guide pour une mobilité quotidienne bas carbone », publié simultanément par *The Shift Project*¹. La décarbonation des transports, toujours presque exclusivement tributaires du pétrole, nous semble être nécessairement une composition de solutions à la fois politiques et techniques. En un mot : systémiques.

L'apparition de nombreux véhicules électriques (et plus généralement bas carbone) est une opportunité majeure pour réussir la sortie des énergies fossiles – sortie à la fois nécessaire et inexorable. Cette opportunité est particulièrement puissante pour la France, qui bénéficie d'une électricité faiblement carbonée, et pour l'Europe, grâce au durcissement de la réglementation sur les émissions des véhicules qu'impose l'Union européenne.

Notre étude comparative fait ici le point sur cette opportunité technique, en se focalisant sur **les véhicules neufs les plus vendus en 2018**. Le prisme principal : **l'impact carbone d'une personne** se déplaçant dans l'Hexagone, en fonction du véhicule qu'elle utilise.

Les chiffres publiés ici doivent être utilisés avec précautions (voir section II.C.) : nous mettons en avant des fourchettes et des moyennes, qui dépendent du contexte d'utilisation de chaque véhicule. Le taux d'occupation, en particulier, est un paramètre décisif : un bus, même électrique, ne fait guère « avancer le schmilblick » s'il est à trois-quarts vide.

Telle est la dimension systémique de la question posée. On ne saurait trop inviter les responsables des politiques de transport à s'attarder sur cette dimension, afin d'en mesurer les implications.

Cette étude explore par ailleurs les opportunités et les obstacles auxquels doivent être confrontés les objectifs de la France en matière de mobilité électrique.

Le rythme élevé de pénétration de la voiture électrique sur lequel repose largement le succès de la SNBC dans son volet transport constitue une hypothèse hardie. L'essor plausible, mais encore incertain, de la « désirabilité » de la voiture électrique pourrait ne pas advenir, si jamais les constructeurs et les pouvoirs publics se révélaient incapables de la nourrir et de l'accompagner. L'apparition de possibles chausse-trappes techniques doit être considérée avec sérieux. Par exemple : un vaste déploiement de la mobilité électrique, non seulement en France, mais partout dans le monde, réclame une croissance colossale, peut-être ici ou là impraticable, des extractions d'un certain nombre de minerais critiques (néodyme, cobalt, lithium, cuivre...), etc.

Le *Shift Project* préconise une approche prudente et documentée des politiques technologiques de sortie des énergies fossiles. Dans le domaine des transports, nous estimons que le chemin le plus sûr passe par la coordination de transformations majeures : d'une part des pratiques d'achat et d'usage des véhicules (la voiture de demain sera peut-être électrique, mais s'il s'agit d'un SUV occupé par une seule personne, à quoi bon ?) ; d'autre part des politiques de transport et d'urbanisme.

La voiture de demain, au moins pour les déplacements du quotidien, pourrait aussi bien être un vélo, un vélo-cargo électrique, un bus et un train. Ce serait bien sûr (très) bon pour la planète. Mais ce serait également bon pour les fins de mois, en permettant à chacun d'économiser des centaines d'euros par an sur son budget de déplacement². Une telle politique est largement à la portée de la France, moyennant des investissements bien inférieurs à ceux qui ont été alloués au réseau autoroutier, ou aux lignes de trains à grande vitesse.

L'approche systémique (la technique, les pratiques, les infrastructures et la réglementation vues comme des outils d'égale importance, et qui doivent être coordonnés) réclame avant tout cohérence et audace. Les nouveaux véhicules bas carbone peuvent être un précieux outil au service de cette approche. Mais ils ne sauraient en aucun cas être une panacée...

L'équipe du Shift

¹ « Guide pour une mobilité quotidienne bas carbone », février 2020, <http://theshiftproject.org>

² Résumé aux décideurs, « Décarboner la mobilité dans les zones de moyenne densité », septembre 2017, <http://theshiftproject.org>

Table des matières

ÉDITO – LA TECHNOLOGIE VA-T-ELLE « SAUVER » LE CLIMAT ?	3
INTRODUCTION : UN COMPLEMENT SUR LES VEHICULES AU « GUIDE POUR UNE MOBILITE QUOTIDIENNE BAS CARBONE »	8
A. La nécessité de « faire système » exprimée dans le Guide.....	8
B. Les véhicules sont conçus pour satisfaire les besoins de déplacements.....	8
C. ... Mais leur utilisation a des conséquences : consommation d'énergie, émissions de CO ₂ , coût, emprise au sol	9
D. Une étude comparative des véhicules pour éclairer la prise de décision sur le développement d'un système de mobilité quotidienne bas carbone	9
E. Déroulé du projet et contenu de cette étude comparative	10
I. LES VEHICULES ET LEUR ECOSYSTEME ENERGETIQUE EN FRANCE EN 2019 ..	11
A. Les véhicules et leur « écosystème » de fonctionnement.....	11
1. Les voitures.....	11
a. Un usage très flexible permis par un écosystème complet autour du véhicule	11
b. Une diversité de vecteurs énergétiques pour alimenter les voitures	12
c. Le cas des voitures hybrides	12
2. Les véhicules utilitaires légers (VUL)	19
3. Les motos	20
4. Les transports en commun	21
a. Les transports en commun routiers	21
b. Les transports en commun guidés	21
5. Les petits véhicules individuels	22
a. La marche à pied	22
b. La famille des cycles.....	22
c. Les vélos à assistance électriques (VAE) et les engins de déplacement personnels électriques (e-EDP)	23
d. Les scooters et cyclomoteurs	23
e. La Twizy.....	24
B. L'alimentation en énergie des véhicules : un système technique complet pour chaque vecteur énergétique.	24
1. Les carburants liquides (l'essence, le diesel et le GPL).....	25
a. Contenu énergétique	26
b. Emissions de CO ₂	26
c. Prix	26
2. Le GNV, carburant gazeux	27
3. L'hydrogène, carburant gazeux.....	27

4.	L'électricité	28
5.	Les substituts « bas carbone » aux vecteurs fossiles	29
a.	Le bioéthanol	29
b.	Le biodiesel	29
c.	Le biogaz carburant (bio GNV)	30
d.	L'hydrogène par électrolyse	30

II. LES CARACTERISTIQUES DES VEHICULES 31

A.	Notre méthodologie d'obtention des chiffres	31
1.	Quelles données avons-nous collecté ?	31
a.	Des données sur les caractéristiques techniques, les possibilités d'usage et les impacts des véhicules 31	
b.	Des données représentant l'ensemble des modèles les plus vendus ces dernières années en France	32
2.	Comment avons-nous calculé la consommation et les émissions de CO ₂ des véhicules ?	33
B.	Résultats : fiches synthétiques des données obtenues par véhicule	38
C.	Limitations dans l'interprétation des données	72
1.	Des valeurs moyennes qui représentent un parc moyen de véhicules vendus en 2018, pour les véhicules individuels motorisés	72
2.	Des valeurs minimales et maximales ne reflétant pas forcément l'ensemble des conceptions possibles	72
3.	Des valeurs n'intégrant pas toujours les dernières avancées technologiques	72
4.	Des valeurs ne tenant pas compte des cas concrets d'usage	73
5.	Comment et pourquoi utiliser ces valeurs ?	73

III. QUELQUES ELEMENTS DE COMPARAISON COLLECTIVE ENTRE LES DIFFERENTS MODES 75

A.	Croiser les véhicules aux usages pour concevoir un système de mobilité qui réponde aux besoins de manière efficace	75
B.	La consommation des véhicules en fonction de leur masse	77
1.	La consommation par kilomètre (à vide)	77
2.	La consommation par passager.kilomètre (si le véhicule est plein)	83

BIBLIOGRAPHIE 84

Tables des encadrés

Encadré 1 : La voiture électrique, clé de la politique climatique de la France : grande opportunité, vastes incertitudes	14
Encadré 2 : Pourquoi le diesel et le GNV alimentent-ils plutôt les modes lourds (voitures, VUL, transports en communs) et l'essence plutôt les modes légers (deux-roues motorisés, voitures) ?	20
Encadré 3 : Les tests de mesure de la consommation et des émissions polluantes, comparés aux conditions réelles de conduite.....	34
Encadré 4 : Quelle consommation et quelles émissions pour les modes « actifs » (à force musculaire) ?	37
Encadré 5 : L'analyse en cycle de vie (ACV) : données carbone pour quelques véhicules	38
Encadré 6 : Pourquoi les émissions en WTW de la marche à pied sont-elles supérieures à celles de la voiture électrique dans cette étude comparative ?	74
Encadré 7 : Quel espace de conception entre les véhicules très légers et les voitures ? S'y trouve-t-il des véhicules particulièrement économes en énergie ?	80

Liste d'abréviations

ACV	Analyse en cycle de vie
BC	Bas carbone
EDP	Engin de déplacement personnel
e-EDP	EDP électrique
GES	Gaz à effet de serre
GNC	Gaz naturel comprimé
GNL	Gaz naturel liquéfié
GNV	Gaz naturel véhicule
GPL	Gaz de pétrole liquéfié
kWh	kilo Watt-heure
LOM	Loi d'orientation des mobilités
NEDC	New European Driving Cycle
OPECST	Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques
PAC	Pile à combustible
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
PPE	Programmation pluriannuelle de l'énergie
SNBC	Stratégie nationale bas carbone
TER	Transports Express Régionaux
TICPE	Taxe Intérieure de Consommation sur les Produits Énergétiques
TTC	Toutes taxes comprises
TTW	Tank to wheel
TVA	Taxe sur la Valeur Ajoutée
VAE	Vélo à assistance électrique
VE	Voiture électrique
VHR	Voiture hybride rechargeable
VP	Voiture particulière
VTC	Vélo tout chemin
VTT	Vélo tout terrain
VUL	Véhicule utilitaire léger
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedures
WTW	Well to wheel

Remerciements

Nous souhaitons remercier l'ensemble des « Shifters » qui nous ont aidé bénévolement à collecter les données qui sont présentées dans cette étude sur les véhicules de transport des personnes : Stéphane Boutonnet, Nicolas Bregou, Tom Collet, Maxime Delva, Victor D'Herbement, Corentin Fauvel, Basile Fighiera, Hugo Poitout, Régis Porhiel, Guillaume Pourquier, Nicolas Rose, Nadine Rouault, Pierre-Alain Sebrecht, Yves Talhouët, Jonathan Vézard.

Nous remercions également Jacques Portalier, Anne Meyer et Francisco Luciano pour leurs commentaires avisés et relectures thématiques. Le contenu de cette note n'engage que *The Shift Project*. Les interprétations, positions et recommandations y figurant ne peuvent être attribuées aux relecteurs.

INTRODUCTION :

Un complément sur les véhicules au « Guide pour une mobilité quotidienne bas carbone »

A. La nécessité de « faire système » exprimée dans le Guide

Comme largement expliqué dans le « Guide pour une mobilité quotidienne bas carbone »³, « le développement d'une mobilité sobre en carbone repose sur une conception systémique des alternatives à l'utilisation de la voiture en solo. **Si la voiture est aussi incontournable dans nos sociétés, c'est parce qu'il ne s'agit pas seulement d'un véhicule, mais bien d'un système**, composé certes des véhicules, et de toute l'industrie qui les sous-tend, mais aussi des infrastructures nécessaires à leur circulation et stationnement (routes, places de stationnement, parkings, garages chez les particuliers, etc.), des services nécessaires à leur fonctionnement (garages de réparation et de contrôle, assurances, etc.), de la fiscalité (qui est une source de revenus non négligeable pour État et collectivités) et aussi d'un imaginaire puissant, construit à travers les décennies et soutenu par des campagnes publicitaires omniprésentes.

Le développement d'une proposition alternative doit nécessairement s'appuyer sur un système aussi articulé, où les véhicules, les infrastructures, les services, la fiscalité, « font système », et ce sans oublier une réorientation du désir vers les modes de déplacement plus sobres. » [1]

B. Les véhicules sont conçus pour satisfaire les besoins de déplacements...

Le système de mobilité quotidienne répond à nos besoins d'accéder à diverses activités au cours de la journée. Ainsi, penser un système de mobilité quotidienne bas carbone, c'est réfléchir aux éléments suivants :

- Le **besoin de déplacement** : peut-on réduire le nombre de déplacements et/ou la distance parcourue de manière acceptable ?
- Le **mode de déplacement utilisé** : peut-on utiliser des modes plus actifs (marche, vélo) et/ou plus partagés (transport en commun, covoiturage) ? Et à quel point est-ce efficace pour réduire l'empreinte environnementale des modes ?
- Les **véhicules** : les modes peuvent-ils être assurés par des véhicules dont le bilan environnemental est plus faible ?

Les véhicules en tant que tels sont conçus pour répondre à certains besoins de déplacement, et peuvent être utilisés selon certains modes (par exemple, une voiture peut être utilisée en autosolisme ou en covoiturage).

On peut catégoriser ces besoins de déplacement selon la distance à parcourir, la vitesse nécessaire si le temps de trajet est un critère important pour l'utilisateur, le nombre de passagers à transporter, ou encore la quantité de marchandises à transporter. Ces besoins sont dépendants d'autres variables, telles que le tissu dans lequel vit l'utilisateur (urbain dense, zone de moyenne densité, rural), l'urbanisme, les caractéristiques sociologiques de l'utilisateur (structure familiale, classe socio-professionnelle...).

³ The Shift Project, « Guide pour une mobilité quotidienne bas carbone », Février 2020, disponible sur https://theshiftproject.org/?page_id=6129

C. ... Mais leur utilisation a des conséquences : consommation d'énergie, émissions de CO₂, coût, emprise au sol

Pour correctement penser un système de mobilité quotidienne bas carbone, il importe également **de connaître les ordres de grandeur des différentes conséquences du développement de tel ou tel véhicule, selon tel ou tel mode**. Il nous a ainsi paru intéressant d'apporter des informations sur :

- la **consommation en énergie** des véhicules ;
- leurs **émissions de CO₂ à l'usage**, ainsi que leurs émissions de CO₂ en tenant compte de l'impact de la production des vecteurs énergétiques qui les alimentent (l'essence, le diesel, l'électricité, le Gaz Naturel Véhicule (GNV), l'hydrogène, les agrocarburants, etc.) ;
- il nous a également semblé important de fournir des données sur **l'emprise au sol** des différents véhicules ;
- et sur leur coût à l'achat et en usage.

D. Une étude comparative des véhicules pour éclairer la prise de décision sur le développement d'un système de mobilité quotidienne bas carbone

Cette note au caractère technique apportera des **éléments de prise de décision complémentaires au décideur local** qui tente de planifier la mobilité sur son territoire, en l'informant des caractéristiques « physiques » de différents véhicules, et en proposant quelques éléments de comparaison entre ces différents véhicules.

Les véhicules, comme nous l'avons évoqué, sont des éléments incontournables d'un système de mobilité, au même titre que les infrastructures et services permettant leur bonne opération. La manière dont les différentes technologies sont utilisées (les « modes ») déterminent alors les impacts en usage de ces véhicules (combien ils consomment d'énergie, combien ils émettent de CO₂). Le « Guide pour une mobilité quotidienne bas carbone » met l'accent sur ces derniers éléments (la notion de systèmes de mobilité, et la notion d'usage), largement négligés dans les discussions sur la transition de notre système de mobilité, tandis que cette note éclaire de manière complémentaire la question des véhicules en eux-mêmes.

Ainsi, elle fournit des **informations chiffrées sur les différents véhicules peuplant le système de mobilité français en 2019**. Plus précisément, elle donne des ordres de grandeur sur un ensemble de caractéristiques clés, à nos yeux, sur les possibilités d'usage des véhicules et sur leurs impacts : par exemple, leur masse, puissance, vitesse de pointe, portée (autonomie), capacité en nombre de passagers, consommation énergétique, émissions de CO₂, emprise au sol, coût à l'usage et à l'achat... Ces ordres de grandeur sont calculés sur la base d'un ensemble de modèles appartenant à chaque catégorie de véhicules.

Mais au-delà des chiffres, ce sont les questions soulevées par cette étude comparative qu'il nous semble important de poser dans les cas concrets de planification de systèmes de mobilité, afin qu'ils soient adaptés aux besoins de chaque territoire :

- En quoi le mode d'usage de tel ou tel véhicule influe-t-il sur sa consommation d'énergie, et sur ses conséquences environnementales ?
- En quoi l'environnement infrastructurel influe-t-il sur ces paramètres ?
- Quelles sont les conséquences infrastructurelles de promouvoir l'usage de tel ou tel véhicule alimenté par tel ou tel vecteur énergétique ?

E. Déroulé du projet et contenu de cette étude comparative

Ce projet s'est déroulé en plusieurs phases successives :

- une phase de planification de la collecte de données, donnant lieu à des canevas de fichiers à remplir ;
- une phase de briefing de l'équipe de recherche, composée de bénévoles « Shifters » et de l'auteur de cette note ;
- une phase de collecte de données sur chaque véhicule, réalisée en parallèle par les membres de l'équipe de recherche ;
- une phase d'agrégation, de validation, et de complétion des données, réalisée par l'auteur ;
- et enfin, une phase de rédaction.

Ce travail a ainsi réuni une quinzaine de « Shifters », bénévoles nous ayant aidé à collecter les données nécessaires aux calculs.

La section I introduit l'ensemble des véhicules que nous avons étudiés ainsi que les différents vecteurs énergétiques⁴ que nous avons considérés.

La section suivante détaille la méthodologie de calcul pour obtenir les chiffres publiés à propos de chaque véhicule, et les résultats bruts par véhicule, sous forme de « fiches véhicule ».

Enfin, nous tirons de ces chiffres quelques éléments comparatifs entre les modes qui nous paraissent intéressants en ce sens qu'ils posent des questions sur les types de véhicules qui pourraient à l'avenir peupler notre système de mobilité.

⁴ Un vecteur énergétique est un véhicule physique, ou un processus physique qui permet de transporter de l'énergie, tel que l'électricité, le pétrole, le gaz, ou l'hydrogène.

I. Les véhicules et leur écosystème énergétique en France en 2019

Dans le cadre de cette étude comparative, nous avons effectué des recherches sur un panel de véhicules de transport des personnes pour la mobilité quotidienne. Nous nous sommes limités aux véhicules existants en France en 2019, selon leurs différentes déclinaisons par vecteurs énergétiques consommés. Ainsi, nous avons inclus dans ce périmètre les voitures, les véhicules utilitaires légers, les motos, les bus et minibus, les transports publics guidés⁵ et les petits véhicules individuels.

Dans un premier temps, nous décrivons ces véhicules et leur écosystème de fonctionnement, puis dans un second temps nous décrivons les différents vecteurs énergétiques qui les alimentent, et quelques éléments des systèmes permettant de rendre ces vecteurs disponibles pour la mobilité – un prérequis pour généraliser l'utilisation des véhicules qui les consomment au quotidien.

A. Les véhicules et leur « écosystème » de fonctionnement

1. Les voitures

La voiture est le véhicule de transport de personnes dominant en France. Ainsi, en 2008, 65 % des déplacements quotidiens étaient réalisés en voiture, pour 83 % des kilomètres parcourus [2]. Le parc automobile français contient un peu plus de 32 millions de voitures en 2019 [3].

a. Un usage très flexible permis par un écosystème complet autour du véhicule

La voiture est d'usage extrêmement flexible et relativement sûr :

- Elle permet de transporter de une à quelques personnes
- Elle permet de transporter un certain volume de biens
- Elle permet de couvrir toute plage de distance terrestre
- Elle permet un usage individuel, c'est-à-dire une disponibilité permanente et la réalisation d'un itinéraire « de porte-à-porte »
- Elle permet un usage relativement sécurisé

Cependant, il faut bien réaliser que cette grande flexibilité d'usage n'est permise que par l'existence d'un écosystème complet permettant le bon fonctionnement de ce véhicule, et sa flexibilité d'usage (ce « système voiture » a été présenté dans le rapport « Décarboner la mobilité dans les zones de moyenne densité » du *Shift* [4]) :

- Un réseau viaire très dense maillant l'ensemble du territoire français. Ce réseau permet la flexibilité « de porte-à-porte », car pratiquement tous les lieux d'activités sont desservis par le réseau viaire.
- Un réseau dense de distribution d'énergie qui permet de ravitailler la voiture en quelques minutes n'importe où en France. Ce réseau permet la grande flexibilité en plage de distance de la voiture.
- Un réseau suffisamment dense de services de maintenance, de dépannage et de réparation, qui permet la disponibilité quasi permanente d'une voiture fonctionnelle, ainsi que des services d'assurance en assurant le financement mutualisé.
- Un maillage suffisamment fin d'espaces de stationnement à proximité de toute origine et destination (places de parking, garages individuels...), qui permet la disponibilité rapide, et la réalisation des itinéraires « de porte-à-porte »

⁵ C'est-à-dire guidés par une infrastructure qui définit leurs possibilités de trajectoire (rails, câble...).

- Un cadre juridique avec un ensemble de règles, notamment de circulation, une force de police permettant de les faire respecter, et un organe judiciaire permettant de punir en cas de non respect de ces règles, ainsi qu'un réseau d'écoles permettant d'apprendre ces règles. Un ensemble de standards de mise sur le marché des voitures, notamment en termes de sécurité des véhicules. Ces règles et standards permettent d'assurer la sécurité de l'usage de ce véhicule.

b. Une diversité de vecteurs énergétiques pour alimenter les voitures

Historiquement, la massification de l'usage de la voiture en France s'est faite à l'**essence**. C'est dans les années 1980 que la motorisation au **diesel** est massivement introduite dans le parc automobile. En 1980, seules 4,5 % des immatriculations sont motorisées au diesel. Quelle est la raison de cet essor ? La montée en puissance du programme nucléaire pousse les ménages à abandonner le fuel pour leur chauffage, au profit du chauffage à l'électricité. Les raffineurs français ont alors une capacité de production de fuel qui ne trouve plus de débouché, sauf à écouler leur fuel sous forme de diesel (les deux étant des parties plus lourdes que l'essence, extractibles du pétrole brut). Le gouvernement diminue alors les taxes sur le diesel en tant que carburant pour les véhicules et incite les constructeurs automobiles à se lancer dans la motorisation diesel, expliquant sa montée en puissance, et le fait qu'il représente aujourd'hui encore 60 % du parc environ [5]. Un bon exemple d'interdépendance entre les usages (le chauffage et la mobilité) induite par l'entremise des vecteurs énergétiques qui les alimentent.

D'autres motorisations aux combustibles fossiles existent en France de manière plus marginale, telles que le **gaz de pétrole liquéfié (GPL)**, issu du raffinage du pétrole et du traitement du gaz naturel, et le **gaz naturel véhicule (GNV)**. Les motorisations GPL sont associées à une bi-carburant (avec de l'essence) car le réseau de distribution de GPL n'est pas assez dense pour assurer tout itinéraire, si bien qu'un second réservoir à essence est présent pour exploiter le réseau de distribution d'essence, beaucoup plus dense. C'est également généralement le cas pour les voitures GNV, mais quelques modèles sont en monocarburant au GNV.

Cependant, d'autres types de motorisation émergent, voire se développent, notamment par la montée en puissance de la contrainte environnementale (que cela soit la qualité de l'air dans les villes, ou les émissions de CO₂) :

- La **voiture électrique**, qui avait été développée en même temps que la voiture thermique à la fin du XIX^{ème} siècle, mais dont le développement avait été stoppé par l'augmentation plus rapide des performances des voitures thermiques. Ce type de motorisation revient, avec des performances en autonomie qui augmentent grâce aux progrès technologiques sur les batteries.
- La **voiture hydrogène**, propulsée par un moteur électrique, lui-même alimenté par une électricité produite par une pile-à-combustible (PAC). Un réservoir d'hydrogène alimente la PAC, qui fonctionne comme une pile : l'hydrogène s'y recombine avec l'oxygène de l'air pour former de l'eau, tout en générant un courant électrique qui alimente le moteur.

En 2019, le parc automobile français compte environ 20 millions de voitures au diesel et 10 millions de voitures à l'essence [3]. On compte environ 140 000 voitures en bicarburant {essence + GPL}, environ 115 000 voitures électriques, 13 000 voitures en bicarburant {essence + GNV} [6] et 465 000 voitures hybrides essence/diesel – électricité (voir section suivante, et Figure 1). Au plus une centaine de voitures hydrogène circulent en France, au sein de flottes privées.

c. Le cas des voitures hybrides

Dans les statistiques et la littérature technique sur le parc de voitures français, une catégorie émerge rapidement : les « véhicules hybrides ». Comme souligné par le site spécialisé automobile-propre.com, « la catégorie des véhicules hybrides regroupe tous les véhicules hybrides « classiques », les hybrides rechargeables ainsi que les véhicules électriques avec prolongateurs thermiques (ou électriques hybrides). Dans chaque cas, **il y a utilisation complémentaire d'un moteur électrique et d'un moteur thermique**⁶. » [7]

Les hybrides dits « classiques » ou « *mild hybrid* » (essence ou diesel hybridés à l'électrique) ne sont pas rechargeables. En considérant la voiture comme un système en boîte noire, les *mild hybrid* fonctionnent au seul vecteur thermique (essence, diesel, etc.), l'usage d'un moteur électrique et/ou d'une batterie ne servant qu'à optimiser au mieux l'usage de ce vecteur thermique. Nous les avons donc classées dans les voitures uniquement

⁶ C'est-à-dire un moteur dans lequel une combustion a lieu, qu'elle soit basée sur l'essence, le diesel, le GPL ou le GNV.

essence ou uniquement diesel, respectivement. On peut estimer le parc français de ces voitures « hybrides » à environ 350 000 voitures essence, et 62 000 voitures diesel [3], [8].

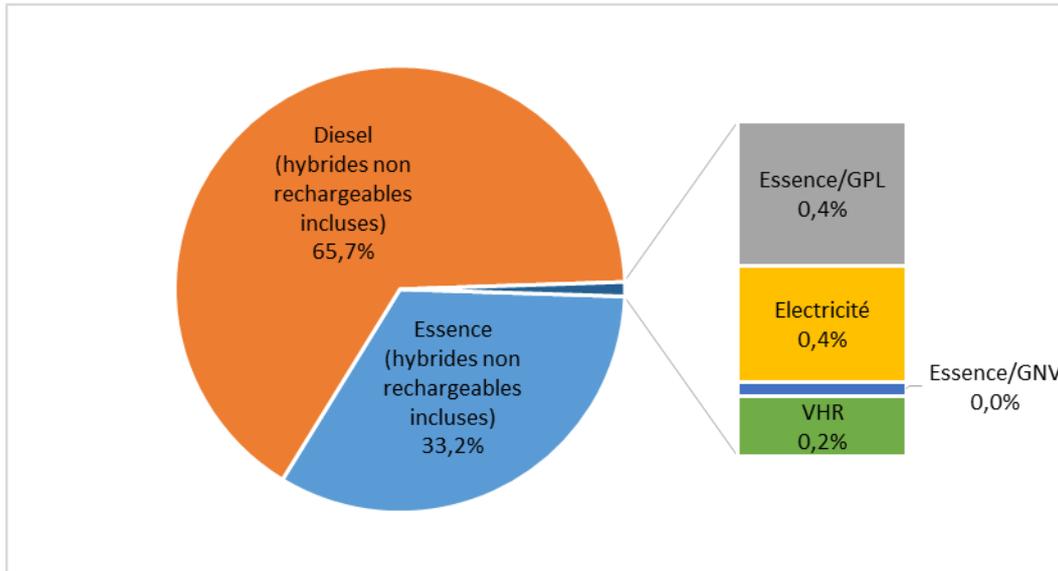


Figure 1 : Parc de voitures en France en 2019, par vecteur énergétique

A contrario, les voitures hybrides rechargeables (VHR) possèdent véritablement deux « entrées » de vecteurs énergétiques différents. Elles sont donc répertoriées dans ce document comme des technologies différentes des voitures « essence », « diesel », ou « électrique ». On peut estimer le parc français de ces voitures à environ 60 000 voitures hybrides rechargeables [8].

Les VHR fonctionnent à l'électricité et l'essence, les VHR au diesel étant rares, pour des raisons historiques et stratégiques pour les constructeurs [9] : l'attaque des marchés par des VHR nécessite des investissements en conception, essais, qui, pour être rentabilisés au mieux, doivent viser les marchés mondiaux, dominés par l'essence⁷. Les conceptions à l'essence ont donc été privilégiées.

Deux grands types d'hybrides existent, distinguées par l'origine de la force motrice permettant à la voiture de se déplacer :

- Les **hybrides parallèles**, dans lesquelles les deux moteurs peuvent assurer la force motrice.
- Les **hybrides séries**, dans lesquelles seul le moteur électrique assure la force motrice, le moteur thermique fonctionnant en génératrice d'électricité qui alimente directement le moteur électrique, ou qui recharge la batterie.

Les hybrides rechargeables « séries » sont parfois appelées « voitures électriques avec extension de portée », dans le sens où le combustible thermique permettrait à la voiture, vue comme une électrique, d'aller plus loin que si elle ne disposait que de sa seule batterie. A contrario, les hybrides rechargeables « parallèles » utiliseraient leurs vecteurs énergétiques essentiellement en fonction de l'efficacité de chaque moteur pour chaque situation de conduite.

Dans les faits, la majorité des hybrides parallèles fonctionnent en mode essentiellement « électrique » tant que la batterie est suffisamment chargée, avec quelques phases d'usage du mode thermique en cas de besoins de puissance spécifique tels qu'une côte ou une accélération forte. Ce n'est que lorsque la charge passe sous un certain seuil qu'ils passent en mode « maintien de charge », lors duquel la batterie est utilisée tout comme le ferait une *mild hybrid*, c'est-à-dire comme un moyen d'optimiser l'usage du vecteur thermique (qui apporte alors seul l'énergie nécessaire au déplacement).

⁷ Le diesel n'étant développé de manière significative qu'en Europe, Inde, et Corée.

Ainsi, la manière dont les hybrides rechargeables sont contrôlées en font toutes des « voitures électriques avec extension de portée ». Autrement dit, **au-delà d'une certaine distance parcourue sans recharger la batterie, tout se passe comme si la voiture hybride rechargeable était une voiture n'utilisant que le vecteur thermique.**

Encadré 1 : La voiture électrique, clé de la politique climatique de la France : grande opportunité, vastes incertitudes

Le futur de la voiture choisi par la France est résolument électrique. La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC), qui est la feuille de route de long-terme devant mener la France à la neutralité carbone en 2050, mise essentiellement sur le passage à une motorisation électrique de toutes les voitures pour décarboner la mobilité des personnes. Ces objectifs sont déclinés dans la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) à moyen terme, ou dans la Loi d'Orientation des Mobilités (LOM) à plus court terme. Ils sont également appuyés par les normes européennes concernant les émissions unitaires de CO₂ des voitures mises en vente, de plus en plus contraignantes.

L'atteinte de ces objectifs implique un changement massif du parc de voitures français⁸, et d'une transition sans précédent dans l'industrie automobile, en moins de 30 ans. Une telle transition soulève de nombreux points d'incertitudes : dans quelles mesures, et sous quelles conditions, ces objectifs pourraient-ils être tenus ? L'évolution est grande pour l'industrie automobile, mais également pour les utilisateurs d'automobiles. Elle aura également de larges effets sur le système électrique qui alimentera les voitures, et sur le tissu industriel extractif minier qui permettra l'approvisionnement en ressources matérielles pour produire les VE à l'échelle mondiale.

Ces transitions fortes et interdépendantes génèrent de nombreuses incertitudes qui représentent autant de risques de ne pas atteindre les objectifs fixés. Comment alors maximiser les chances de les atteindre dans ce champ d'incertitudes ? Ce genre de questionnement doit être soulevé si on veut se doter d'une stratégie de décarbonation qui leur est robuste. Une telle stratégie doit alors mettre en jeu un ensemble panaché de solutions de mobilité, ce qui est l'objet du Guide pour une mobilité quotidienne bas carbone [1] : politiques de réduction des déplacements (urbanisme, télétravail, distribution des achats...), de report modal, d'augmentation des taux de remplissage, et plus généralement, politiques favorisant l'usage de véhicules adaptés au juste de besoin de mobilité dans un souci d'efficacité énergétique et matérielle.

Des objectifs de transition vers la VE très ambitieux

Les objectifs finaux et intermédiaires de la stratégie française sur la transition du parc de voitures peuvent sembler très ambitieux :

- En termes de parc de voitures électriques (VE), la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) prévoit qu'il représente 3 millions de voitures électriques (soit environ 10 % du parc) et 1,8 millions de VHR en 2028 [10].
- En termes de ventes de VE, la LOM (article 73), reprenant la SNBC, fixe l'objectif de terminer la vente de voitures et VUL neufs utilisant des énergies fossiles d'ici 2040, afin d'atteindre en 2050 une décarbonation complète du secteur des transports terrestres, entendue sur le cycle carbone de l'énergie utilisée (WTW). Notons que l'arrêt des ventes de neuf n'empêche pas la vente d'occasion. Notons également que rien n'est précisé sur l'usage de biocarburants (pourra-t-on vendre des voitures thermiques, mais ne s'alimentant qu'en biocarburant ?). La SNBC se donne pour objectif que 100 % des ventes de voitures soient électriques en 2050, avec un objectif intermédiaire de 35 % en 2030 [11].
- Quant aux normes d'émissions européennes, elles seront de 95 gCO₂/km en 2021, avec une courte période de transition, puisque 95 % des ventes des constructeurs devront atteindre cet objectif dès 2020. Des relâchements de cette contrainte seront accordés pour chaque vente de voiture à très basses émissions (moins de 50 gCO₂/km) [12]. Les émissions moyennes de CO₂ des voitures neuves, après une baisse continue depuis 2008, stagnent depuis 2016 à 117 g/km [13] ; de plus, comme expliqué dans l'**Encadré 3**, la baisse qui a été observée a en majorité été due à une exploitation de plus en plus fine⁹ des conditions du test de mesure, si bien que seulement 30 à 50 % de la baisse a effectivement été répercutée sur la route. Il semble donc que la contrainte des 95 gCO₂/km soit très puissante, poussant les constructeurs vers

⁸ Qui a déjà subi une très forte mutation dans les années 80 et 90 de l'essence au diesel, comme expliqué dans la section I.A.1.b.

⁹ Comme par exemple le choix des équipements montés sur le modèle testé, le choix des pneumatiques, le choix de la lubrification et du réglage fin du comportement moteur, ou encore le choix des conditions météorologiques de test sur circuit.

les VHR et les électriques pures afin de relâcher la contrainte normative sur leurs ventes de voitures thermiques.

On constate l'effet de ces objectifs et normes sur le parc de voitures français : le nombre de voitures électriques et de VHR est en forte hausse. On estime à 2019 le parc de VE à 115 000 unités et celui de VHR à environ 60 000 unités.

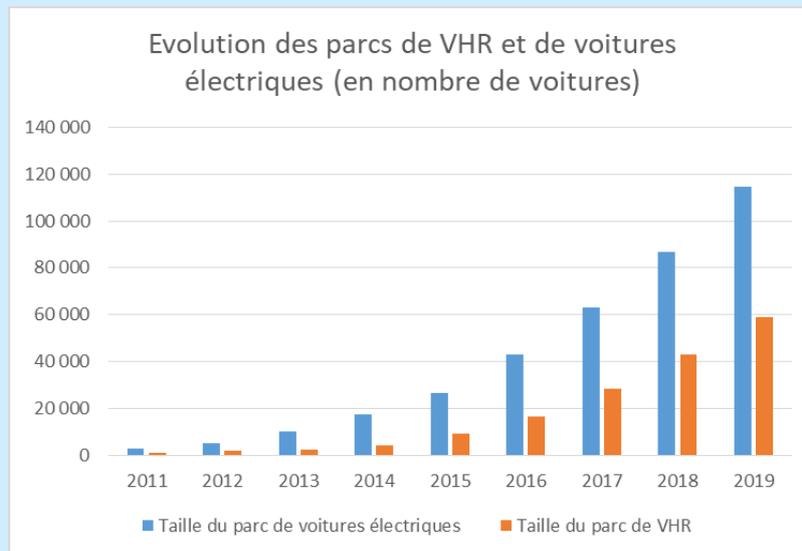


Figure 2 : Evolution des parcs de VHR et de VE entre 2011 et 2019 en France.

L'objectif de la PPE (3 millions de VE, et 1,8 millions de VHR dans le parc en 2028) requiert donc une multiplication respectivement par 25 et par 30 de la taille des parcs électrique et VHR, en moins de 10 ans, soit des taux de croissance annuels moyens de plus de 40 % et de plus de 50 % respectivement. A titre de comparaison, le taux de croissance annuel moyen des 3 dernières années étant d'environ 40 % pour l'électrique, mais en baisse (33 % en 2019), et de 53 % pour les VHR mais en baisse également (33 % en 2019). Malgré cette ambition, notons que cet objectif ne représente « que » 10 % du parc actuel, composé du plus de 30 millions de voitures. Il s'agit d'un objectif intermédiaire de rampe de lancement pour la filière afin que le parc fasse une transition complète vers l'électrique. Quant à l'objectif de la SNBC, il ne dit rien de la taille du parc final, mais précise que les kilomètres parcourus en voitures dans la mobilité des personnes passeront de 79 % (2015) à 70 % (2050), ce qui pourrait laisser augurer sur le long-terme d'une baisse de la taille du parc.

Nous souhaitons donc interroger cet objectif de la PPE : dans quelle mesure peut-il être tenu, et sous quelles conditions ? A notre sens, l'atteinte de cet objectif est conditionnée à l'action conjointe, maintenue dans le temps, et cohérente de tout un écosystème d'acteurs :

- L'utilisateur de voiture, qui exprime un besoin de mobilité. Ce besoin doit être satisfait par la voiture électrique. Diverses études montrent que les réticences (déclaratives) des automobilistes à passer à la voiture électrique proviennent de quatre facteurs principaux : la portée (l'autonomie) de la voiture, le coût (à l'achat, et en coût total de possession¹⁰), l'existence d'un réseau de bornes de recharge, et la vitesse de recharge [14]. Ces réticences ne pourront être dépassées qu'en comparaison aux moyens de mobilité concurrents (les voitures thermiques).
- Les constructeurs automobiles et équipementiers, qui doivent produire assez de voitures électriques, et à un prix compétitif pour les consommateurs, pour atteindre l'objectif.
- Les acteurs « secondaires » mais facilitant l'atteinte de l'objectif, tels que les concessions autoroutières qui doivent équiper les aires de service de bornes de recharge, ou encore les propriétaires de parking, et les syndicats de copropriété [10].
- L'Etat, qui doit coordonner les efforts par des signaux clairs.

Les enjeux pour les constructeurs et équipementiers automobiles

Les constructeurs automobiles européens et mondiaux rivalisent d'annonces quant à l'ambitieux développement futur de leur gamme électrique. Par exemple, Volkswagen prévoit de vendre 25 % de VE d'ici 2025 sur l'ensemble

¹⁰ C'est-à-dire en comptant le coût d'achat et le coût à l'usage.

de ses marques (Volkswagen, Audi, Porsche, etc.), avec 50 modèles de VE. Le groupe BMW prévoit de commercialiser 12 modèles de VE d'ici 2025, et Mercedes-Benz, 10 modèles de VE d'ici 2022. Renault entend doubler sa production de « Zoé » d'ici 2022, et Nissan se positionne également sur l'électrique en envisageant de vendre un million de voitures électriques ou hybrides par an d'ici 2022 [15].

D'après le cabinet Deloitte, la capacité de production mondiale de VE en 2030 par les constructeurs traditionnels et par les nouveaux entrants, notamment chinois, et telle que planifiée par les constructeurs eux-mêmes, sera trop grande (35 millions de VE/an) par rapport à la demande (14 millions de VE/an) [14]. Etant donnée cette abondance d'offre, le cabinet prévient que certains constructeurs ont à perdre sur ce marché très concurrentiel.

Notons de plus qu'actuellement la valeur ajoutée principale des constructeurs européens, qui représente environ 35 % de la valeur totale des voitures, provient de la fabrication des moteurs thermiques et des boîtes de vitesse¹¹ [12]. Or, dans la VE, la fabrication des moteurs (électriques) constitue une faible valeur ajoutée, et la boîte de vitesse n'est plus nécessaire¹². C'est en fait la batterie qui représente la part la plus importante de la valeur (entre 30 et 40 %) d'une VE. Ainsi, si les constructeurs européens ne captent pas cette part de la valeur, le nombre d'emplois dans le secteur sera amené à baisser [12]. C'est ainsi que fin 2019, sept Etats de l'UE ont été autorisés par la Commission européenne à subventionner un consortium de 17 entreprises européennes à hauteur de 3,2 milliards d'euros, lesdites entreprises s'engageant à investir 5 milliards dans ce projet « d'Airbus des batteries » [18]. A titre de comparaison, Tesla a prévu 4 milliards d'investissement dans une nouvelle « Gigafactory » à Berlin, qui permettra de produire 150 000 Tesla par an [19].

Les enjeux pour les constructeurs sont donc des enjeux de gestion de la surproduction et de la répartition de la valeur, avec, pour les constructeurs et équipementiers européens, la question de la production des batteries.

Les enjeux pour les utilisateurs d'automobiles

Les constructeurs annoncent des avancées technologiques qui devraient rassurer les automobilistes quant à l'autonomie des VE, notamment en termes de progrès incrémentaux sur la densité énergétique des batteries, puis, de manière plus incertaine, par l'arrivée de nouveaux concepts de batteries, tels que les lithium-air ou lithium-souffre, l'usage d'autres ions (sodium) ou peut-être les batteries solides d'ici 10 ans [14]. Ces avancées devraient permettre des autonomies de 500 km à court terme (selon le cycle NEDC, soit plus probablement 400 km dans des conditions favorables de conduite).

Côté coûts, la VE devrait, selon le cabinet Deloitte, égaler la voiture thermique d'ici 2024 en coût total de possession au Royaume-Uni, essentiellement grâce à des baisses de coût sur les batteries [14]. Le prix de l'électricité en France étant d'environ 30 % de moins, cette date de compétitivité devrait être atteinte plus tôt, mais pour la même raison de baisse de coût des batteries. Ce dernier est passé de 1000\$/kWh stocké à environ 220\$/kWh en 10 ans [20]. Des simulations réalisées par l'IFPEN et le CEA dans le cadre d'un rapport réalisé par l'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques (OPECST) prennent pour hypothèse médiane (consensus d'experts) une baisse des coûts de la batterie à 120 €/kWh à l'horizon 2040 (230 € en 2018) [21].

Malgré les prévisions de compétitivité de la VE dans un avenir proche par Deloitte, les constructeurs et équipementiers français considèrent qu'un soutien financier constant entre 2020 et 2030 doit accompagner la VE pour pouvoir obtenir des parts de marché suffisantes [22], interrogeant en creux ces prévisions. De même, le rapport de l'OPECST suggère que le surcoût à l'achat d'une VE demeure aujourd'hui trop grand pour que son coût total de possession soit inférieur à celui d'une voiture thermique. Il recommande de maintenir les aides à l'achat jusqu'en 2030, date à laquelle les prix d'une VE et d'une voiture thermique devraient se valoir¹³.

Concernant le manque (réel ou perçu) d'infrastructures de recharge, la PPE prévoit un réseau de 7 millions de bornes de recharge (dont 10 % en accès libre) d'ici 2030, et un objectif intermédiaire de 100 000 bornes accessibles au public en 2022 (soit environ le nombre de pompes à essence actuel) [12]. Il existe aujourd'hui en France 240 000 bornes de recharge au total, accessibles au public ou privées [23]. Outre leur nombre, il convient que les bornes soient installées aux bons endroits et délivrent la puissance adaptée à leur usage (plus la borne est puissante, plus elle recharge la batterie rapidement) : des bornes principales, à domicile ou sur le lieu de l'entreprise, à moyenne

¹¹ Ces éléments représentent un tiers de la valeur ajoutée captée par les constructeurs. Le reste de leur valeur étant en conception, fabrication des pièces de carrosserie, design et assemblage.

¹² Sauf à rechercher des performances particulières [16], ou à optimiser de quelques pourcents l'autonomie [17].

¹³ En tenant compte des émissions du véhicule thermique, qui entraineront un malus à l'achat selon les futurs standards d'émissions de CO₂ européens.

puissance ; des bornes secondaires, sur les lieux d'activités secondaires (achats, vacances...), à forte puissance ; des bornes d'itinérance afin d'assurer les longs trajets, à forte puissance [10].

Sous l'ensemble de ces conditions (une autonomie s'approchant de celle de la voiture thermique, un coût compétitif, et des infrastructures de recharge), la VE pourrait atteindre en premier lieu le marché des ménages possédant deux voitures ou plus, l'une des voitures devant pouvoir servir aux longs trajets (la voiture des vacances familiales), les autres ne pouvant servir que pour les trajets du quotidien. L'objectif de 3 millions de VE en 2030 est alors à comparer au nombre de ménages possédant 2 voitures ou plus : ils étaient 9,6 millions en 2008 [2].

Notons cependant que le surcoût à l'achat d'une VE neuve par rapport à une voiture thermique reste encore de 6 000 à 15 000 €, réservant ces véhicules neufs à des ménages aisés ou des entreprises, malgré les bonus écologiques associés. Ces derniers profitent donc principalement à ces premiers. La vente en seconde main ne permet pas d'obtenir d'aide (sauf en cas de mise à la casse d'une voiture diesel âgée, via la prime à la conversion de 2 000 € pour les ménages à faible revenus [24], ne compensant pas forcément le surcoût de la voiture électrique). Cela pose la question de la pénétration de la VE dans les tissus sociaux moins aisés, ces ménages acquérant leur(s) voiture(s) principalement de seconde main. Outre les différentes aides (achat, conversion), la pénétration dépendra du parc de VE neuves qui sera effectivement déployé, donc de l'offre en VE et de la demande en VE neuves. Si ce parc était amené à être composé de voitures de forte puissance et de forte masse (c'est la tendance actuelle), le surcoût à l'achat pourrait être tel que le parc pourrait se scinder en deux marchés : un marché électrique neuf et d'occasion pour les ménages aisés, et un marché thermique pour les ménages à faibles revenus. Cela nuirait assurément au développement massif de la voiture électrique.

Une alternative est en train d'émerger : le *retrofit* (conversion) d'une voiture thermique en VE par un changement de motorisation et un ajout de batterie. L'opération coûte pour l'instant 8 500 € (5 000 € avec le niveau de bonus écologique en 2019) et fournit une portée d'une centaine de kilomètres [25]. Cette opération pourrait permettre à certains ménages de passer à l'électrique à moindre coût. Une usine de 40 personnes pour massifier cette opération devrait être opérationnelle courant 2020, à condition que l'homologation des voitures retrofitées soit autorisée d'ici là...

Outre cette question sociologique, **l'outil bonus/malus à l'achat est connu pour ne soutenir le développement d'un marché qu'à ses premiers pas**, car dès lors que le marché se massifie réellement le volume d'aide devient trop important pour être soutenu dans le temps par l'Etat (sauf politique keynésienne). C'est ainsi que le bonus en France est d'ores et déjà annoncé à la baisse pour les prochaines années, et plus orienté vers les petites VE, l'enveloppe globale de subventions restant constante [26].

Tous ces facteurs (performance de la voiture électrique, coût total de possession, développement des infrastructures l'accompagnant, incitations fiscales) jouent *in fine* sur l'image de la VE, et sur la désirabilité qu'elle générera. Il faut ainsi ajouter à ces facteurs les dépenses de publicité qui seront en toutes hypothèses engagées par les constructeurs, fortement poussés par les standards d'émissions européens à vendre des véhicules très basses émissions dès l'année 2020 [27]. Le basculement d'image aura-t-il lieu entre le thermique et l'électrique, notamment sur les modèles électriques haut-de-gamme qui seront en concurrence avec des voitures thermiques de plus en plus impactées par les malus à l'achat ?

Des contraintes sur le système électrique face au déploiement de la VE ?

Face au déploiement massif projeté pour la voiture électrique, à l'échelle française, européenne, et mondiale, des questions sont soulevées, relatives à de potentielles limites qui pourraient freiner ce développement.

La question de l'évolution du système électrique, en lien avec celle de la disponibilité suffisante en énergie et en puissance électrique est ainsi régulièrement posée. Elle a été traitée par RTE (Réseau de transport d'électricité), dans le cas français, dans le cadre d'un groupe de travail réunissant l'ensemble des parties prenantes. Il apparaît qu'aucune tension sur le réseau électrique n'est à craindre en cas de fort développement des VE (jusqu'à 16 millions, soit la moitié du parc actuel, consommant 40 TWh d'électricité annuellement) d'ici 2035. Le cas le plus défavorable testé (développement de VE à grande capacité de batterie, et peu de contrôle sur le moment de charge des voitures) mène à de possibles tensions lors des hivers froids [28].

En 2050, la SNBC prévoit un parc de VP totalement électrifié et consommant annuellement environ 100 TWh d'électricité, soit un peu plus de 20 % de la consommation française en 2018. La question de l'évolution du système électrique et de son dimensionnement vis-à-vis de la demande en électricité est donc clé. Les efforts de sobriété prévus dans la SNBC (notamment sur l'isolation thermique à grande échelle des bâtiments) qui doivent permettre

de limiter la demande en électricité sont sources d'incertitude, qui se répercute sur le secteur de l'automobile via le système électrique. Ce dernier sera-t-il dimensionné de manière adéquate si jamais ces objectifs de sobriété ne sont pas atteints mais que les objectifs dans le domaine de l'automobile le sont ?

Quant à la question de la puissance électrique appelée au moment des recharges, elle dépend essentiellement de la capacité du système électrique à piloter de manière globale ces recharges, afin qu'elles ne surviennent pas à des moments critiques pour le bon fonctionnement du réseau. Avec un tel pilotage, tout à fait abordable technologiquement, la mobilité électrique pourrait même fournir une certaine flexibilité au réseau et y faciliter l'intégration de sources d'énergies renouvelables variables.

Des contraintes de ressources matérielles sur le développement de la VE ?

La question de la disponibilité en matériaux, tels que le lithium ou le cobalt, ont également été soulevées [29]. Le développement mondial du marché de la VE sera tributaire d'un développement très considérable de la production de certains minerais clés, développement potentiellement problématique à cause de possibles contraintes d'ordre géologique, géopolitiques, économiques, de réglementation environnementale.

Une forte croissance mondiale de la VE et de la VHR représenterait une consommation cumulée d'environ 12 % des réserves de lithium d'ici 2030, laissant la contrainte géologique suffisamment lointaine pour avoir le temps de trouver des solutions alternatives. Cependant, à technologie de batterie actuelle, il faudrait tripler la production mondiale de lithium d'ici 2025, ce qui risque de créer des tensions sur l'offre, même si les acteurs de la production semblent pouvoir répondre à cette demande [15].

Le **cobalt** est produit à 60 % en République Démocratique du Congo, ce qui mène à des risques d'ordre géopolitiques sur ce matériau. D'autre part, le cobalt est en grande partie un co-produit de l'extraction du cuivre ou du nickel, ce qui asservit sa production à d'autres marchés, augmentant les risques économiques sur son extraction. Il importe donc de se diriger vers des filières de recyclage poussées, ou vers des substituts complets ou partiels, pour éviter ces risques [15]. Selon un corpus de scientifiques britanniques dans une lettre au Committee on Climate Change [30], l'impact mondial d'une forte croissance de la VE au niveau mondial (2 milliards de VE en 2050) requerrait de multiplier par plus de 3,5 la production annuelle de cobalt dès demain et de l'y maintenir, y compris avec les prochaines technologies de batteries (NMC 811, très frugales en matériaux).

La question de la production de néodyme et dysprosium, qui devrait augmenter de 70 % dès demain et jusqu'en 2050, pour assurer un parc de 2 milliards de voitures électriques, se pose également.

Ces questions soulèvent enfin celles du **recyclage de ces matériaux**, de la mise en place des filières dédiées, et de la quantité d'énergie consommée par les industries extractive, productive, et de recyclage associées à ces voitures.

En conclusion...

Compte tenu de l'ensemble de ces incertitudes, il est sans doute hasardeux de tout miser sur la VE, conférant un rôle majeur aux politiques de réduction des déplacements (urbanisme, télétravail, distribution des achats...), de report modal, d'augmentation des taux de remplissage, et plus généralement aux politiques favorisant l'usage de véhicules adaptés au juste de besoin de mobilité dans un soucis d'efficacité énergétique et matérielle [31], afin de rendre la trajectoire d'évolution de nos systèmes de mobilité plus robuste à ces incertitudes.

Du côté du marché automobile, l'atteinte des objectifs ambitieux fixés par le gouvernement présuppose qu'un ensemble d'acteurs se mettent rapidement en mouvement de manière coordonnée, afin d'éviter les différents écueils possibles. Une pression réglementaire est actuellement mise sur les constructeurs automobiles, les menant à investir pour se positionner de manière ambitieuse sur le marché de la VE et de la VHR. Il faut cependant assurer un débouché à cette production future, via des investissements significatifs pour organiser l'écosystème complet de la voiture électrique, et ainsi satisfaire les différents usages des automobilistes : investissements dans les bornes de recharge, dans les filières de recyclage des batteries, dans le développement de filières d'excellence en Europe (production, recherche et développement dans les batteries), ou dans les aides à l'achat, en particulier pour assurer un « ruissellement » des VE vers les ménages les moins aisés par les jeux de changement de main.

Un fort développement de la VE doit se faire de concert avec une évolution du système électrique adaptée, et doit, par cette dépendance au système électrique, tenir compte de l'évolution de tous les autres usages reposant sur

l'électricité (le chauffage, l'éclairage, l'industrie, le numérique...), et des incertitudes sur leurs évolutions dans un contexte de forte transition énergétique.

La capacité à extraire et produire les matériaux nécessaires au développement de la VE et à les acheminer sur les lieux de production des pièces automobiles ajoute des incertitudes d'ordre industriel, géologique et géopolitique. Autrement dit, une transition rapide de la voiture thermique vers l'électrique requiert de passer d'un tissu industriel pétrolier (exploration, extraction, raffinage, logistique pétrolière...) et de filières d'approvisionnement en carburants fossiles, qui sont établis depuis plusieurs décennies, à un tissu industriel d'extraction minière de divers matériaux, pour l'instant largement sous-dimensionné, et à de nouvelles filières d'approvisionnement, à construire et sécuriser pour toutes les parties prenantes en jeu. Ces évolutions majeures sont sujettes à de nombreuses incertitudes.

Et la voiture à hydrogène ?

La voiture hydrogène possède l'avantage d'un usage très proche de celui des voitures thermiques (portée similaire, temps de recharge court).

Cependant, comme décrit dans la section I.B.3, l'hydrogène se transporte très difficilement. Sa production doit donc se faire de manière décentralisée, et si possible sur le lieu de la station-service. Afin d'être décarbonée, elle doit se baser sur de l'électricité bas carbone, via l'électrolyse de l'eau. A l'heure actuelle, ce procédé coûte cher : on estime que produire de l'hydrogène par ce procédé coûte entre 210 € et 560 €/MWh PCI¹⁴ (contre 60 à 70 €/MWh PCI pour les carburants fossiles). Le scénario médian de développement des technologies de transport par l'IFPEN et le CEA suppose un coût de 135 €/MWh d'ici 2040 [21]. Ce coût ne permettrait pas à la voiture hydrogène d'émerger sur le marché face à l'électrique. Il faudrait une baisse très forte (à 90 €/MWh, selon un autre scénario de la même étude) pour lui permettre d'émerger significativement.

La voiture à hydrogène semble donc ne pas pouvoir jouer de rôle significatif à moyen-terme de manière économique.

2. Les véhicules utilitaires légers (VUL)

Les véhicules utilitaires légers (VUL) sont des véhicules destinés au transport commercial ne dépassant pas un poids total autorisé en charge de 3,5t.

Les voitures, si elles sont utilisées pour du transport commercial de personnes ou de matériel, sont donc des VUL. Cependant, la catégorie des VUL inclut également les camionnettes et les fourgonnettes de transport de personnes ou de marchandise.

C'est donc une catégorie relativement large, ce qui apparaîtra sous la forme d'une large variabilité dans les données recueillies sur ces véhicules.

Les VUL roulent avec les mêmes vecteurs énergétiques que les voitures, à quelques nuances près : comme ce sont des véhicules commerciaux, leur rentabilité, et donc leur consommation au kilomètre, est un critère important, ce qui favorise le diesel par rapport à l'essence. De plus, ces véhicules sont généralement plus lourds que les voitures, ce qui favorise également le diesel, associé à des moteurs plus lourds et plus puissants (voir **Encadré 2**). Ainsi, **très peu de modèles de VUL essence sont vendus** (nous n'avons pris en compte que deux modèles dans nos recherches).

Le **VUL hydrogène, quant à lui, n'en est qu'à l'état de prototype** (nous n'avons trouvé qu'un modèle dans cette catégorie¹⁵).

¹⁴ Pouvoir Calorifique Inférieur, voir section I.B.

¹⁵ Il s'agit d'un retrofit de Renault Kangoo électrique qui a été équipé avec un réservoir hydrogène et une pile à combustible rechargeant la batterie d'origine, l'hydrogène agissant comme un prolongateur d'autonomie

Encadré 2 : Pourquoi le diesel et le GNV alimentent-ils plutôt les modes lourds (voitures, VUL, transports en communs) et l'essence plutôt les modes légers (deux-roues motorisés, voitures) ?

Plusieurs raisons, physiques, économiques et politiques, expliquent ces constats.

Commençons tout d'abord par les carburants en eux-mêmes : l'essence et le diesel sont de densités énergétiques élevées (le diesel contenant un peu plus d'énergie par unité de volume que l'essence, voir Figure 3), alors que le GNV, gazeux, prend beaucoup plus de place. **Le GNV requiert donc de volumineux réservoirs, mal adaptés aux modes légers.** Réduire la taille des réservoirs pour l'adapter à la taille du véhicule reviendrait à réduire la portée du véhicule sans recharge. Or, le **réseau de distribution de GNV est faiblement maillé en France.** Ce manque de points de charge explique en partie pourquoi le GNV n'alimente que peu de voitures. Cet état de fait pour le GNV ne l'élimine cependant pas des usages plus « professionnels », comme le transport en commun ou le transport de marchandises, dans la mesure où ces usages utilisent des routes fixes, pouvant justifier l'installation de **points de distribution GNV dédiés à la flotte de véhicules professionnels.**

Quelques considérations techniques sur les moteurs participent également à expliquer la différence de motorisation entre les modes lourds et les modes légers. Les moteurs essence et les moteurs GNV sont les mêmes. Ils fonctionnent à allumage commandé, c'est-à-dire que l'explosion du carburant dans les cylindres est déclenchée par des bougies d'allumage. Les moteurs diesel, a contrario, ne commandent pas l'allumage : celui-ci se réalise spontanément, par compression suffisamment forte du mélange air-diesel pour atteindre le point d'auto-inflammation du diesel, à des températures plus élevées que dans un moteur essence. Pour cette raison, le moteur diesel atteint des températures de gaz plus élevée et des contraintes mécaniques plus fortes, et doit donc être plus épais et plus lourd qu'un moteur essence de puissance équivalente [32]. **Le moteur diesel est donc mieux adapté pour des véhicules plus lourds.**

De plus, les **moteurs diesel ont un meilleur rendement** : 42 % pour le diesel contre 36 % pour l'essence [33]. Cela joue économiquement en leur faveur (hors fiscalité), dans leur phase d'usage, ce qui est d'autant plus important pour les véhicules de transport de passagers ou de marchandises, qui roulent beaucoup. La fiscalité historiquement favorable au diesel a accentué cet avantage du diesel pour les modes lourds.

Enfin, **la fiscalité et la politique environnementale expliquent le développement du GNV – certes faible – principalement dans les véhicules lourds** étant donné le volume pris par le stockage du GNV : le GNV est deux fois moins bruyant que le diesel, donc préféré dans les villes. En outre, ses impacts en termes de pollution de l'air sont moindres (-27 % d'émission de NOx et -84 % d'émission de particules par rapport à un véhicule diesel équivalent) [34]. Ainsi, par exemple, l'Ile-de-France vient de commander 409 bus au gaz naturel, à livrer entre 2020 et 2021, ces véhicules étant jugés « propres » et moins bruyants [35].

3. Les motos

L'usage des deux-roues motorisés (motos et cyclomoteurs) est minoritaire : il représente 2 % des déplacements quotidiens et 2 % des distances parcourues. Cet usage est plus grand dans les centres des grandes agglomérations [2], ce qui peut s'expliquer par les contraintes d'espace qui y règnent pour les voitures et les véhicules plus gros (congestion, difficulté à stationner).

La moto dispose ainsi d'avantages de flexibilité aussi grands, voire plus, que la voiture, puisqu'elle bénéficie du même écosystème de services, infrastructures, etc. Elle est cependant moins confortable¹⁶, car les passagers sont soumis aux intempéries, et au bruit du véhicule.

Le parc de motos contenait environ 2,2 millions de véhicules en 2008.

Les motos sont motorisées à l'essence. Les motos électriques apparaissent, pour des raisons de moindre coût du vecteur énergétique et d'une image écologique (pas de pollution locale de l'air, pas bruyantes), mais leur nombre reste négligeable. Ainsi, 1 500 unités de motos électriques (équivalent 125 cm³ ou plus) ont été vendues en France en 2018 [36]. Leur faible autonomie (ou le poids de la batterie trop grand pour de bonnes performances), et le faible nombre de bornes de recharge expliquent cet état de fait.

¹⁶ La notion de confort est en partie subjective, et peut évoluer au grès des changements culturels, des habitudes et des pratiques.

4. Les transports en commun

Les transports en commun dans leur ensemble représentaient, en 2008, 8 % des déplacements et 11 % des distances parcourues dans le cadre de la mobilité quotidienne [2].

Comparés à la voiture, les transports en commun offrent un temps utile que le conducteur d'une voiture n'a pas. Par contre, le niveau de confort est moins élevé car l'espace dans le transport est commun : les environnements auditif (musique, chaîne radio, silence), ou thermique (température de l'habitacle, ventilation), sont donc non contrôlés.

Quant à la flexibilité individuelle, elle est nécessairement moindre, car le transport en commun ne passe qu'à une fréquence horaire donnée, et selon un trajet donné, contraignant l'origine et/ou la destination du trajet. Ainsi, ces transports n'assurent pas la mobilité « de porte-à-porte ».

Par contre, dans les zones denses, le transport en commun peut être favorisé par rapport à la voiture s'il dispose d'une infrastructure dédiée et d'avantages de circulation, tels que des couloirs/voies réservés ou la priorité aux intersections. D'autre part, il ne requiert pas de temps de recherche de stationnement.

a. Les transports en commun routiers

Les transports en commun routiers regroupent les autobus (dont l'usage est essentiellement urbain et dans lequel les passagers peuvent être debout), les autocars, dont l'usage est plutôt interurbain et dans lequel les passagers sont assis (par exemple entre la périphérie d'une grande agglomération et son centre), et les minibus, dont l'usage en « transport à la demande » peut être décrit comme un intermédiaire entre le covoiturage et le transport en commun traditionnel. Nous avons distingué dans nos recherches ces différents véhicules.

En 2010, le parc d'autobus et d'autocars était d'environ 90 000 véhicules. En 2017, il était d'environ 100 000 véhicules (67 000 autocars et 27 000 autobus en 2016 [37]), et est stable depuis lors [3]. En 2016, le parc d'autobus se composait principalement – à 70 % - de bus standards (12 m de long), à 20 % de bus articulés (18 m de long), et à 10 % de bus plus petits [37]. Les autocars, eux, mesurent entre 12 m et 13 m.

Le parc de bus et de cars se compose en grande majorité de véhicules diesel (97 %, dont 2 % sont hybridés avec de l'électricité, mais non rechargeables, qui permettent des baisses de consommation de 10 % à 20 % selon l'utilisation), puis de véhicules au GNV (3 %), et de véhicules électriques (1 %) [3].

L'ensemble de ces véhicules sont dépendants du réseau viaire, comme l'est la voiture, mais également d'infrastructures et services spécifiques pour leur stationnement pendant leur inactivité (dépôts), pour leur maintenance et réparation (ateliers), pour leur recharge, leur lavage, ou pour la logistique et le stockage des pièces de rechange. Un réseau d'arrêts de bus plus ou moins matérialisé physiquement doit également être en place. En outre, un réseau d'informations pour que l'utilisateur connaisse les horaires et les lignes doit être accessible (site Internet, informations à l'arrêt, fascicules à disposition...).

De nombreux éléments concernant les différentes filières énergétiques de bus sont accessibles dans le panorama de l'ADEME/AJBD dédié aux autobus : type de carburant, infrastructures requises, réglementations, fiscalité, maturité des filières, mode d'exploitation, maintenance, données économiques, impacts environnementaux... [37]. Des informations sur les différentes filières énergétiques existant dans le monde pour les autocars sont disponibles dans le rapport de l'ADEME/FNTV/Régions de France à ce sujet [38].

b. Les transports en commun guidés

Les transports en commun guidés rassemblent dans cette étude comparative les transports en commun qui sont guidés par leur infrastructure : le train, le métro, le tramway, et le transport par câble (type téléphérique/télécabine).

Le métro, le tramway, le transport par câble¹⁷, et la majorité des trains des Transports Express Régionaux (TER) fonctionnent à l'électricité. Mais contrairement aux autres modes, la source d'énergie qui les propulse n'est pas transportée avec le véhicule. L'électricité provient généralement du réseau électrique haute-tension (HTB)

¹⁷ Regroupant les téléphériques, télécabines, funiculaires [39].

directement, transmise au véhicule par un système d'électrification ferroviaire. L'alimentation passe alors par un rail au sol, ou par une caténaire.

Concernant les TER, environ 52 % des rames sont motorisées à l'électricité uniquement, 18 % sont motorisées au diesel seulement, et 19 % sont « bi-modes », c'est-à-dire qu'elles possèdent les deux motorisations et peuvent fonctionner soit à l'électrique, soit au diesel [40]. Evidemment, les rames diesel et bi-mode sont équipées de réservoirs à diesel.

Ces véhicules sont tous dépendants d'une infrastructure qui leur est dédiée. Cette infrastructure peut être extrêmement lourde et coûteuse, comme pour le métro, lourde comme pour le train ou le tramway, ou plus légère comme pour le transport aérien par câble.

5. Les petits véhicules individuels

Les petits véhicules individuels représentent les véhicules légers et peu puissants, qui peuvent transporter deux personnes au maximum. On abordera également la marche à pied, qui n'est pas un véhicule en tant que tel.

a. La marche à pied

La marche à pied reste prépondérante dans la vie des Français, puisqu'elle représentait 22 % des déplacements du quotidien en 2008. Cependant, en termes de distance parcourues (et donc d'énergie dépensée à se déplacer), elle est négligeable (seuls 2 % des distances parcourues le sont à pied) [2].

La marche à pied requiert à la personne se déplaçant un certain effort physique et ne lui permet pas d'aller plus vite que quelques kilomètres par heure, limitations qui n'existent pas en voiture, rendant le confort et la praticité de la marche très dépendants de la distance parcourue : la marche ne permet pas de couvrir quotidiennement de grandes distances. D'autre part, la personne est soumise aux intempéries. La marche est silencieuse. Ainsi, le confort de la marche à pied est nettement différent de celui de la voiture. La marche permet une activité physique, ce qui a des effets positifs sur la santé.

L'énergie qui permet la marche est l'énergie apportée par les aliments que nous ingérons, et dont les nutriments sont « brûlés » au sein des muscles, en réaction avec l'oxygène que nous respirons. Ces réactions génèrent de la chaleur, et alimentent le mouvement de nos muscles, permettant la marche (ou tout autre effort musculaire).

La marche à pied requiert dans l'absolu peu d'infrastructures, comme peut l'illustrer la randonnée en montagne ou en forêt, qui ne requiert de fait que la création d'un chemin. En milieu urbain, où différents véhicules aux énergies cinétiques très différentes cohabitent, un espace de circulation dédié aux piétons, surélevé voire protégé par des plots ou barrières (le trottoir) est nécessaire. Des espaces d'intersection avec les différents véhicules également : passages piétons, feux piétons. Un ensemble de règles de circulation s'applique aux piétons, notamment à leur intersection avec les espaces dédiés aux autres véhicules (routes, bandes-cyclables, voies de bus, tramway...).

b. La famille des cycles

En 2008, le vélo représentait 3 % de nos déplacements pour 1 % des distances parcourues de la mobilité quotidienne.

Comme développé dans le rapport « Décarboner la mobilité dans les zones de moyenne densité » [4], la famille des cycles est une vaste famille de véhicules et permet de couvrir un large ensemble de besoins : vélos, vélos-cargos ou vélos avec carriole pour transporter des enfants ou des courses, vélos équipés de sièges supplémentaires pour les enfants, vélos-tricycles pour les personnes à mobilité réduite... A cela pourrait s'ajouter les Engins de Déplacement Personnel (EDP) non électriques (trottinettes, skate-board). Ces derniers ont été considérés dans cette étude sous leur version électrique (voir paragraphe suivant) uniquement. Notons que les vélos permettent de transporter une certaine quantité de marchandises (dans des sacoches latérales) et/ou des enfants (dans un siège-enfant sur le porte-bagage ou sur une selle dédiée à l'avant), contrairement aux EDP.

Dans tous les cas, ces véhicules sont alimentés par l'énergie musculaire, comme pour la marche. Les facteurs à considérer dans le confort pour les cycles sont en fait les mêmes que pour la marche, si ce n'est que l'effort à fournir peut être plus intense, mais moins long que pour la même distance à pied.

La famille des cycles, comme les autres véhicules, doit disposer d'un écosystème d'infrastructures et de services pour fonctionner efficacement. Cet écosystème est régulièrement appelé « système vélo » dans le monde académique et associatif. Les éléments que pourrait contenir un système vélo en France sont les suivants [1], [4] :

- Des infrastructures, des règles et une signalétique permettant la libre circulation des cycles. Par exemple, dans les centres-villes ou centres-bourgs : double-sens cyclables, réduction des vitesses pour rendre plus sûr l'usage d'une voirie commune entre les modes ; entre les bourgs : pistes cyclables séparées de la route, ou bandes-cyclables (intégrées à la route) si les vitesses et le flux des voitures le permettent ; partout : signalétique pour intégrer les cycles au flux de véhicules, stationnements pour les cycles, possibilités d'intermodalité avec les transports en commun.
- Des services et équipement dédiés au vélo : services d'achats et de réparation des vélos par un personnel qualifié, assurances dédiées aux cycles, sécurisation des stationnements, écoles d'apprentissage de la pratique du vélo.

c. Les vélos à assistance électriques (VAE) et les engins de déplacement personnels électriques (e-EDP)

Il est difficile d'estimer l'usage des VAE et autres EDP électriques (e-EDP), ces usages étant relativement récents dans la mobilité du quotidien et se développant très rapidement [41]. On peut cependant documenter l'essor de ces usages par l'évolution du parc des véhicules correspondants :

340 000 VAE ont été vendus en 2018, dont les trois quarts pour un usage « du quotidien » (c'est-à-dire des vélos de ville ou des VTC¹⁸, en opposition aux VTT ou vélos de route, dont l'usage est du domaine du sport ou du loisir), et on peut estimer le parc de VAE à plus d'un million d'unités en supposant que la tendance 2019 se soit confirmée [42]. De manière plus générale, chaque membre de la famille des cycles possède sa version « à assistance électrique » (vélo cargo à assistance électrique, tricycle à assistance électrique), en plein essor [43]. On estime également que le nombre d'utilisateurs des e-EDP est de 500 000. En 2018, 300 000 hoverboards (ou gyroskates), 230 000 trottinettes électriques, 26 000 skate-boards électriques et 6 000 gyroroues ou gyropodes ont été vendus, représentant une part significative du parc, et illustrant par là même sa forte croissance [44].

Ces ventes témoignent d'un usage « du quotidien » émergeant rapidement.

Comparé aux cycles à force musculaire, l'effort à fournir en VAE est moindre, et est encore plus faible avec les e-EDP (la station debout est requise pour les e-EDP, mais c'est le seul effort à fournir). Le niveau de confort est donc similaire à celui de la marche, mais les temps de parcours à distance égale sont bien plus faibles. Par contre, concernant les e-EDP, nouveaux et jusqu'à récemment non réglementés en tant que tels, ils sont plus accidentogènes [45]. Les EDP viennent cependant d'entrer dans le code de la route [46], ce qui pourra avoir des effets bénéfiques sur leur accidentologie.

Ces véhicules, dont la vitesse d'usage, et l'espace pris au sol, sont très similaires à ceux du vélo, requièrent le même type de « système » que le système vélo. C'est ainsi que le code de la route exclut dorénavant les EDP des trottoirs et les assigne aux infrastructures cyclables ou, à défaut, à la voirie à faible vitesse [46].

d. Les scooters et cyclomoteurs

Nous incluons dans la catégorie des scooters et cyclomoteurs les 2 ou 3-roues motorisés, de cylindrée inférieure ou égale à 125 cm³. Nous appelons ces véhicules les scooters¹⁹.

Les scooters se déclinent en une motorisation « classique » à l'essence, ou en une motorisation électrique.

Le marché des 50 cm³ à essence a enregistré une baisse en 2018 (de 100 000 unités en 2017 à 65 000 unités en 2018 [47]), à corréliser avec la forte hausse des marchés des VAE et e-EDP [36].

Le marché des scooters électriques, lui, croit. Il s'en est vendu, en 2018, 8 500 unités en équivalent 50 cm³ et 1 500 unités en équivalent 125 cm³ ou plus.

¹⁸ Vélo tout chemin.

¹⁹ Bien que, techniquement parlant, le scooter se caractérise par une forme de cadre particulière, formant un plancher, et des roues de faible diamètre, le différenciant de la moto y compris pour des puissances équivalentes.

Le scooter utilise une partie importante des infrastructures et services dédiées à la voiture. Il n'y a guère que les voies rapides qui lui sont interdites. Comme tous les deux-roues, les forces de l'ordre françaises tolèrent qu'ils se « fauflent » entre les voies de circulation pour éviter les congestions [48].

Le scooter dispose du même niveau de confort que le VAE, mais sans effort à fournir. En fonction de la motorisation, le niveau de bruit est un atout (électrique) ou un inconvénient (thermique).

e. La Twizy

La Twizy constitue dans notre étude comparative une catégorie à elle-seule, étant donnée l'inexistence sur le marché français de véhicules du même gabarit. La Twizy dispose de 2 places, est très compacte, motorisée à l'électrique, et dans sa version initiale simple dispose d'un toit mais pas de portière ni de vitres latérales (ces équipements sont proposés en option), ce qui soumet l'utilisateur à la température extérieure mais pas à la pluie.

La Twizy est techniquement un « quadricycle », léger ou lourd en fonction de la version considérée. La Twizy 45 est pilotable sans permis quand la Twizy 80 requiert le permis B²⁰. La Twizy utilise les mêmes infrastructures qu'un scooter [49]. Cependant, elle ne peut pas se faufler entre les files de voitures, et subit donc la congestion.

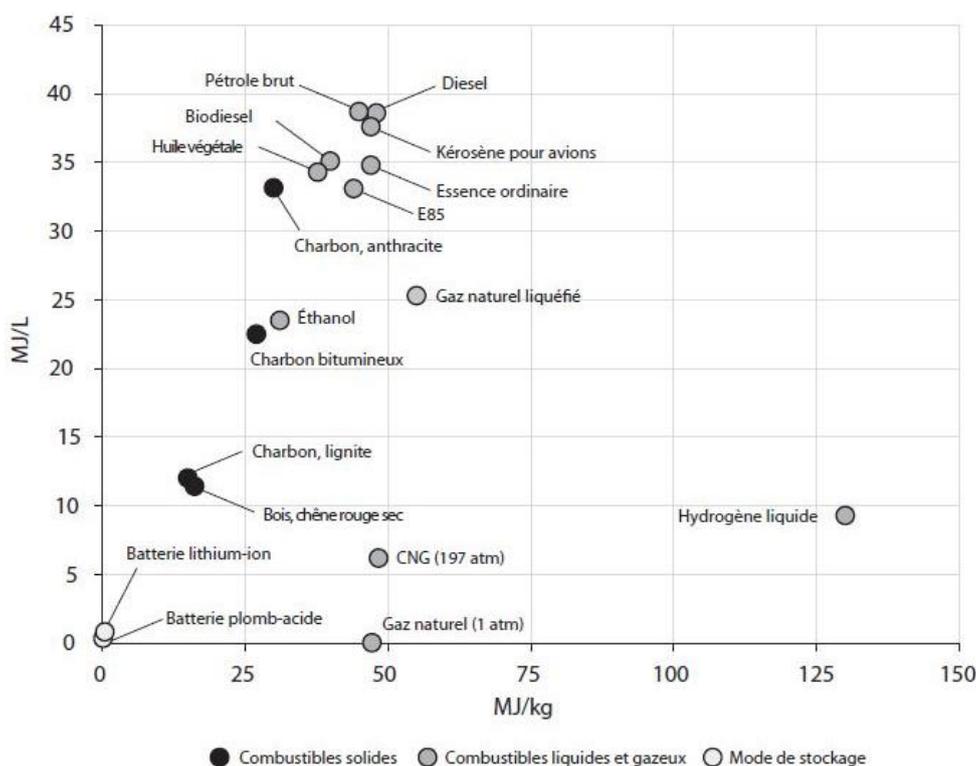
La Twizy se vend extrêmement peu en Europe [50]. Nous nous sommes intéressés à ce véhicule en raison de sa position particulière en termes de masse et puissance, à mi-chemin entre les scooters et les voitures. Il nous a donc semblé utile de l'inclure dans cette étude comparative.

B. L'alimentation en énergie des véhicules : un système technique complet pour chaque vecteur énergétique

Les véhicules décrits sont alimentés par différents vecteurs énergétiques : l'essence, le diesel, l'électricité, le gaz naturel véhicule (GNV), le gaz de pétrole liquéfié (GPL), ou le dihydrogène (H₂). Les vecteurs fossiles (essence, diesel, GNV, GPL, et H₂ produit par vaporeformage) se déclinent parfois en une version que nous avons appelée « bas carbone » (BC), car leur bilan carbone « du puit à la roue » (voir II.A.2.) est plus faible que leur équivalent fossile : ainsi, le bioéthanol (produit à partir de biomasse) peut se substituer à l'essence, le biodiesel peut se substituer au diesel, le bioGNV peut se substituer au GNV, et le H₂ peut être produit par électrolyse de l'eau avec une électricité décarbonée, au lieu d'être produit par vaporeformage à partir de gaz naturel.

Nous avons regroupé des données sur ces vecteurs : leur contenu énergétique, leurs émissions de CO₂ à la combustion (pour les carburants), leurs émissions « du puit à la roue », leur coût unitaire, ainsi que des éléments relatifs au système nécessaire à leur bonne utilisation dans le cadre de la mobilité.

²⁰ Le permis « voiture ».



Sources : pour le charbon, Tadeusz Patzek et Gregory Croft, « A Global Coal Production Forecast with Multi-Hubbert Cycle Analysis », *Energy*, vol. 35, n° 8, 2010, p. 3111 ; pour le gaz naturel, <<https://people.hofstra.edu/geotrans/eng/ch8en/conc8en/energycontent.html>> ; pour le pétrole brut et le bois, <http://w.astro.berkeley.edu/~wright/fuel_energy.html> ; pour les batteries, <www.allaboutbatteries.com/Battery-Energy.html> et <<http://thebulletin.org/limits-energy-storage-technology>> ; et pour les autres formes de stockage, Charles Hall and Kent Klitgaard, *Energy and the Wealth of Nations: Understanding the Biophysical Economy*, New York, Springer, 2012.

Figure 3 : Densité volumétrique et de masse de combustibles et de modes de stockage. CNG fait référence au gaz naturel compressé. On voit que les carburants liquides ont une densité volumétrique d'énergie de plusieurs ordres de grandeur plus grande que celle des carburants gazeux non compressés ou que les technologies actuelles de stockage de l'électricité. Source : [51].

On peut comparer ces différents vecteurs selon la quantité d'énergie qu'ils transportent dans une unité de volume ou une unité de masse (voir Figure 3 présentant la quantité d'énergie en MégaJoules (MJ) contenue dans différents vecteurs énergétiques). Nous décrivons dans cette section leurs caractéristiques par unité d'énergie qu'on peut extraire de ces vecteurs, en kiloWatt-heure²¹ (kWh) ou MégaWatt-heure (MWh).

1. Les carburants liquides (l'essence, le diesel et le GPL)

L'essence et le diesel sont les carburants rois de la mobilité routière en France, de par leur forte densité énergétique, en termes de quantité d'énergie stockée par unité de volume ou par unité de masse (voir Figure 3). Ils sont établis depuis des décennies dans la mobilité française, par un système qui permet leur usage dans ce domaine. En 2019, le parc automobile français compte environ 20 millions de voitures au diesel et 10 millions de voitures à l'essence [3].

Parmi les carburants liquides, on trouve également le gaz de pétrole liquéfié (GPL), minoritaire en France. On compte environ 140 000 voitures en bicarburant essence + GPL en France en 2019.

²¹ 1 kWh vaut 3,6 MJ

Un système de production, de raffinage et de logistique de ces carburants permet leur usage en bonne et due forme : très synthétiquement, le brut est acheminé de son lieu d'extraction jusqu'aux raffineries françaises par un réseau mondial composé d'oléoducs et de terminaux maritimes. Notre capacité à s'approvisionner en brut dépend donc de nos relations internationales avec les pays producteurs et avec les pays parcourus par les oléoducs.

Le brut est ensuite raffiné par plusieurs procédés afin notamment d'obtenir l'essence, le GPL et le diesel. Onze raffineries sont présentes en France dans ce but.

Un réseau de distribution maillant finement le territoire permet d'acheminer ces carburants des raffineries jusqu'aux stations-services, afin que chaque utilisateur de véhicule puisse s'alimenter près de son lieu d'habitation ou d'activité (courses, travail). Ce réseau est composé de chaînes logistiques par camions, et des stations-services elles-mêmes.

Le territoire français compte environ 11 000 stations-services distribuant essence et diesel. Ce nombre a fortement chuté depuis 1975, où l'on comptait plus de 45 000 stations, la chute ayant été la plus marquée dans les années 1980. Cette dernière s'explique principalement par la faiblesse des marges de distribution, et s'est effectuée avec un basculement des stations détenues par les sociétés pétrolières vers des stations détenues par les marques de grande distribution [52]. Les grandes surfaces (supermarchés ou hypermarchés) deviennent ainsi les lieux d'aboutissement d'un grand nombre de réseaux de distribution cruciaux pour la vie du consommateur. Le consommateur n'a plus qu'un lieu à visiter pour s'approvisionner en biens, nourriture et commodités.

Environ 1 800 stations-service distribuent du GPL [53].

a. Contenu énergétique

L'essence, le diesel et le GPL sont des carburants liquides et ont donc des densités énergétiques par unité de volume élevées. D'après la base carbone de l'ADEME [54] :

- Le diesel dégage 9,86 kWh de chaleur PCI²² par litre.
- L'essence dégage 9,23 kWh de chaleur PCI par litre.
- Le GPL dégage 6,87 kWh de chaleur PCI par litre.

b. Emissions de CO₂

Toujours d'après la base carbone de l'ADEME, les émissions de CO₂ associées à la combustion de ces carburants par unité d'énergie PCI sont les suivantes :

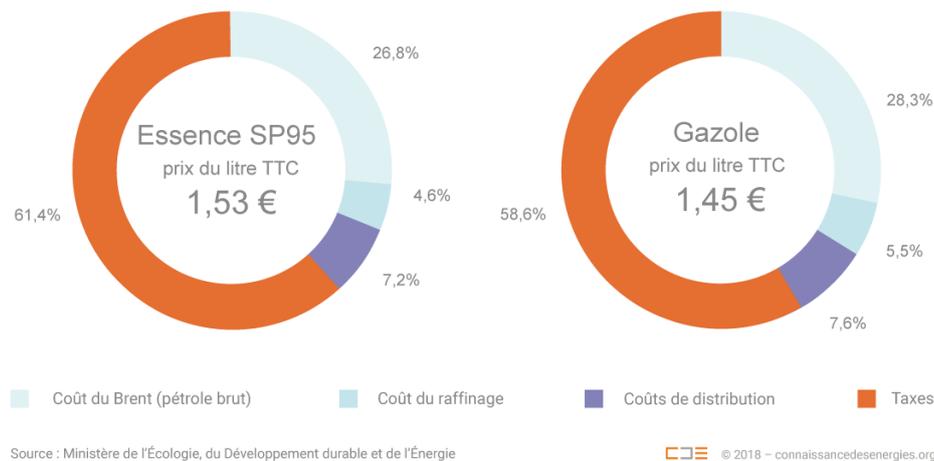
- Le diesel émet 254 gCO₂/kWh à la combustion, et 322 gCO₂/kWh si on tient compte des phases amonts de sa production, transformation, transport et distribution.
- L'essence émet 253 gCO₂/kWh et 312 gCO₂/kWh si on tient compte des phases amonts de sa production, transformation, transport et distribution.
- Le GPL émet 233 gCO₂/kWh et 272 gCO₂/kWh si on tient compte des phases amonts de sa production, transformation, transport et distribution.

c. Prix

Le prix des carburants est composé des coûts d'extraction (souvent principalement une rente assurée au possesseur des champs pétroliers), de transport, de raffinage, de distribution, modulés par les lois de l'offre et de la demande mondiale, les carburants liquides étant sur un marché mondial. Enfin, le prix TTC prend en compte les taxes mises en place en France sur ces produits. Le pétrole brut représente environ un quart du prix à la pompe (via les étapes d'extraction et de transport), quand les taxes représentent environ 60 % de ce prix [56].

²² « Le pouvoir calorifique inférieur (PCI, ou lower heating value : LHV en anglais) est une propriété des combustibles. Il s'agit de la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible, la vapeur d'eau étant supposée non condensée et [s]a chaleur non récupérée. Par hypothèse, l'énergie de vaporisation de l'eau dans le combustible ou chaleur latente et les produits de réaction ne sont pas récupérés » [55]. Nous utilisons dans cette étude comparative le pouvoir calorifique inférieur, car c'est la chaleur « haute température » potentiellement récupérable dans un moteur de véhicule.

Structuration des prix à la pompe (mai 2018)



On peut estimer le prix TTC des carburants (fin 2019) en se basant sur le site dédié du gouvernement [57] :

- Environ 150€/MWh pour le diesel
- Environ 170 €/MWh pour l'essence
- Environ 124 €/MWh pour le GPL

2. Le GNV, carburant gazeux

Le GNV est du gaz naturel (méthane) qu'on comprime (gaz naturel comprimé, GNC) ou qu'on refroidit (à -163°C à pression atmosphérique) pour le rendre liquide (gaz naturel liquéfié, GNL), afin de pouvoir le stocker dans un réservoir de taille acceptable sur le véhicule qu'il propulse. Liquéfié, le gaz prend environ 600 fois moins de place que gazeux [34], et sa densité énergétique est 2,8 fois plus importante que celle du GNC, permettant de parcourir des portées plus longues pour un volume de réservoir moindre [37], d'où son application dans le transport lourd et maritime.

Le GNV est beaucoup moins développé que les carburants liquides. On compte environ 70 stations distribuant du GNV au public [58]. Le GNV se déploie pour les transporteurs routiers (bus ou camions) depuis quelques années, en raison de son prix plus faible lié à une fiscalité favorable. Les transporteurs peuvent mettre en place leur propre station de distribution, alimentant leur flotte de véhicules : 240 stations leur sont dédiées [34].

Les stations de GNC sont directement connectées au réseau gazier. Elles disposent de compresseurs permettant de comprimer le gaz du réseau. En fonction de la taille des compresseurs, le remplissage du véhicule est plus ou moins rapide. Les stations peuvent également disposer de capacité de stockage du gaz sous forme comprimée pour faciliter des recharges rapides (en quelques minutes) [59].

La combustion du GNC dégage 13,78 kWh PCI/kg, et émet 188 gCO₂/kWh PCI. Si on tient compte des phases amonts, les émissions dues à la production et combustion du GNC sont de 230 gCO₂/kWh PCI.

Son prix est estimé à environ 0,86 € HT/kg [60], soit 81 € TTC/MWh en tenant compte de la TICPE (Taxe Intérieure de Consommation sur les Produits Énergétiques) et de la TVA (Taxe sur la Valeur Ajoutée) en 2019 [61].

3. L'hydrogène, carburant gazeux

Le dihydrogène (H₂), souvent appelé hydrogène dans le monde de la mobilité, est produit, en France, à 94 % à partir de gaz naturel [62] par vaporeformage (SMR, Steam Methane Reforming en anglais). Le vaporeformage consiste à faire réagir du méthane avec de la vapeur d'eau à haute température (environ 900 °C) pour obtenir un gaz de synthèse (un mélange d'H₂, de CO₂ et d'autres gaz) qu'il faut purifier pour obtenir le H₂ [63].

Au maximum quelques centaines de véhicules hydrogènes circulent en France, appartenant à des flottes privées, et une vingtaine de points de distribution existent [64]. Ces véhicules sont en fait des véhicules électriques : l'hydrogène y est transformé, via une pile à combustible, en électricité, qui alimente ensuite un moteur électrique. L'hydrogène étant un vecteur énergétique plus dense que la batterie électrique, il permet d'augmenter l'autonomie du véhicule électrique.

Les pays d'Europe de l'Ouest et les Etats-Unis possèdent de petits réseaux d'échange d'hydrogène par pipeline, entre les usines de production d'hydrogène et celles qui l'utilisent²³, totalisant environ 1 600 km de pipeline pour l'Europe de l'Ouest. L'hydrogène est transporté sous pression. Le transport de l'hydrogène peut également se faire par camion, ou par voie maritime, sous forme comprimée [65]. Cependant, le transport de l'hydrogène requiert de l'énergie ; par camion, l'énergie dépensée à le transporter sous forme comprimée est plus grande que l'énergie transportée elle-même. Pour transporter de grandes quantités d'hydrogène sur de longues distances, il faudrait un transport à l'état liquide par pipeline, ce qui requerrait de grandes capacités de cryogénéisation et d'isolation. Ainsi, il est plus envisageable de produire l'hydrogène de manière décentralisée, voire sur le lieu-même de la station. Cela pourrait se faire à partir du réseau gazier, par vaporeformage, ou à partir du réseau électrique, par électrolyse [66]. C'est ce type de production décentralisée qui est effectuée dans les quelques stations-services existantes dans le monde.

La combustion de l'hydrogène dégage 33,33 kWh PCI/kg [67]. Dans le véhicule, la réaction de l'hydrogène avec l'oxygène n'émet pas de CO₂. Cependant, la production de l'hydrogène par vaporeformage est émettrice de CO₂. On peut estimer que les émissions associées sont comprises entre 210 et 300 gCO₂/kWh PCI [68].

Quant au prix de l'hydrogène, il est difficile à estimer car l'hydrogène ne se vend pas au grand public. On peut cependant estimer le coût de fabrication de l'hydrogène par vaporeformage à 45 à 75 €/MWh PCI [69].

4. L'électricité

L'électricité est générée par des unités de production qui transforment une autre forme d'énergie en électricité. Ces unités sont connectées à un réseau de transport et de distribution d'électricité à l'échelle métropolitaine, lui-même en interconnexion avec le réseau européen.

Ces unités de productions sont alimentées par divers vecteurs énergétiques : en France, il s'agit de l'Uranium 235 (centrales nucléaires), d'eau stockée en altitude (centrale hydroélectrique), du gaz (cycles combinés au gaz²⁴ et centrales thermiques classiques²⁵), du charbon (centrales au charbon), ou de l'énergie éolienne (turbines éoliennes), photovoltaïque (panneaux photovoltaïques), ou biomasse (centrales à biomasse).

Le parc de voitures électriques en France est d'environ 115 000 voitures, et ce nombre est en progression. Le vecteur électrique est également utilisé par certaines motos, par certains bus ou minibus, par les transports en commun guidés, et par certains petits véhicules individuels (le VAE et les EDP) (voir section I.A. précédente).

Pour les véhicules électriques avec batterie, les infrastructures de recharge diffèrent en fonction de la quantité d'énergie à charger, et de la vitesse à laquelle on veut charger cette énergie. Une charge lente suffit lorsque le véhicule doit être rechargé lors de son immobilité la nuit. Par exemple, certains VAE ou scooters électriques ont une batterie amovible qui peut se recharger sur secteur au domicile. Des points de recharge dans le garage des ménages, ou, pour les bus, au dépôt des bus, peuvent remplir cette fonction. Lorsque la recharge doit être rapide car effectuée pendant le trajet, ou pendant le service (dans le cas des transports en commun), des bornes de recharge plus puissantes sont nécessaires. Elles peuvent se situer sur les aires de service d'autoroute pour assurer les trajets longue distance, ou au terminus des bus pour une recharge pendant les temps de battement. Enfin, des modes de recharge « en ligne », par biberonnage, sont également envisageables (par exemple pour les bus électriques) : de petites recharges régulières sont effectuées à chaque arrêt à l'aide d'un bras articulé se connectant à la borne de recharge, ou par induction, au sol ou par le toit du véhicule.

²³ L'hydrogène est utilisé pour le raffinage des produits pétroliers et pour la production d'ammoniac principalement.

²⁴ Ces centrales combinent une turbine à gaz alimentée par la combustion du gaz, et un cycle thermique récupérant la chaleur restante dans les gaz d'échappements via un circuit secondaire à eau.

²⁵ Ces centrales génèrent l'électricité à partir d'une turbine à gaz uniquement.

Pour les véhicules électriques sans batterie (les trains, les tramways...) l'électricité provient généralement du réseau électrique haute-tension (HTB) directement, transmise au véhicule par un système d'électrification ferroviaire, passant par un rail au sol, ou par une caténaire.

Les véhicules électriques consomment directement l'électricité grâce à un moteur électrique. Ainsi, l'énergie cinétique du véhicule n'est pas générée par une combustion au sein du véhicule. Aucune émission de CO₂ n'est donc associée à l'usage du véhicule.

Par contre, la production de l'électricité peut émettre du CO₂, majoritairement par la combustion de gaz et de charbon dans les centrales associées. Selon la base carbone de l'ADEME, les émissions du mix électrique français sont de 57 gCO₂/kWh (elles sont de 420 gCO₂/kWh en moyenne pour le mix de l'Union Européenne à 27 pays) [70].

Le prix de l'électricité est estimé à 171 € TTC/MWh [71].

5. Les substituts « bas carbone » aux vecteurs fossiles

Les équivalents « bas carbone » des vecteurs fossiles ont une composition chimique proche, voire identique, de celle du vecteur fossile qu'ils cherchent à substituer. Ils peuvent donc être mélangés au vecteur fossile dans de plus ou moins grandes proportions sans avoir à modifier le moteur des véhicules alimentés.

a. Le bioéthanol

Le bioéthanol est un substitut partiel à l'essence. Il s'obtient par fermentation des sucres contenus dans la biomasse contenant du sucre ou de l'amidon (canne à sucre, betterave, blé, maïs...). Dans le futur, il pourrait être produit également en se basant sur d'autres végétaux, notamment des résidus de l'agriculture (génération 2), ce qui permettrait à cette production de ne pas forcément être en compétition directe avec l'alimentation, du point de vue de l'usage des sols [72]. Il semblerait que la génération 2 soit en passe de voir le jour en France [73].

En France, le bioéthanol est déjà incorporé dans le sans-plomb (SP) 95 à hauteur de 5 % et dans le SP95 - E10 à hauteur de 10 %. Le super-éthanol E85 en contient jusqu'à 85 %, mais ce carburant ne peut être utilisé que par des véhicules dont le moteur a été adapté [74].

Le bioéthanol a un contenu énergétique de 5,83 kWh/L [75].

Nous considérons dans cette étude comparative que le bioéthanol est de génération 1, et que sa biomasse source est exploitée de manière durable (pas de changement d'affectation des sols). Nous retenons par convention des émissions nulles à la combustion (le carbone émis n'étant pas fossile).

Par contre, certaines émissions en phase de production du bioéthanol génèrent une augmentation de l'effet de serre (principalement des émissions de CO₂ fossile et de N₂O, émissions provenant de la culture et de la transformation et la distribution des produits de culture). Ainsi, ces émissions amont sont de 144 gCO₂/kWh PCI (base carbone de l'ADEME).

Le coût de production du bioéthanol dépend des coûts de production de la biomasse à partir de laquelle il est produit, qui dépend elle-même de son lieu de production (climat, ensoleillement, pluviométrie...). Ainsi, on peut estimer le coût de production du bioéthanol comme étant compris entre 95 € (Etats-Unis) et 140 €/MWh (Europe) [76].

b. Le biodiesel

Comme son nom l'indique, le biodiesel est un substitut au diesel. Il s'obtient par hydrogénation de l'huile de colza ou de tournesol (génération 1). Dans le futur, il pourrait être produit également en se basant sur d'autres végétaux, notamment des résidus de l'agriculture (génération 2), ou sur des algues (génération 3) [72]. Des procédés de seconde génération ont récemment été opérationnalisés en France [77].

Le biodiesel est déjà incorporé dans les gazoles B7 ou B10, à hauteur de 7 % et 10 % respectivement [74].

Le biodiesel a un contenu énergétique de 9,17 kWh/L [75].

Nous considérons dans cette étude comparative que le bioéthanol est de génération 1, et que sa biomasse source est exploitée de manière durable (pas de changement d'affectation des sols). Nous retenons par convention des émissions à la combustion nulles (le carbone émis n'étant pas fossile).

Par contre, certaines émissions en phase de production du biodiesel génèrent une augmentation de l'effet de serre (principalement des émissions de CO₂ fossile et de N₂O, émissions provenant de la culture et de la transformation et la distribution des produits de culture). Ainsi, ces émissions amont sont de 110 gCO₂/kWh PCI (base carbone).

Tout comme le bioéthanol, le coût de production du biodiesel dépend des coûts de production de la biomasse à partir de laquelle il est produit, qui dépend elle-même de son lieu de production (climat, ensoleillement, pluviométrie...). On peut estimer le coût de production du biodiesel comme étant compris entre 65 € (Malaisie-Indonésie) et 110 €/MWh (Europe) [76].

c. Le biogaz carburant (bio GNV)

Comme son nom l'indique, le bio GNV est un substitut au GNV et est composé de (bio)méthane. Le biométhane est produit à partir de la fermentation anaérobie d'intrants agricoles, de boues d'épuration ou encore de déchets ménagers fermentescibles. C'est la méthanisation (génération 1). Dans le futur (horizon de maturité commerciale : 2030), deux voies de production de génération 2 sont envisagées : un procédé de pyrogazéification et méthanation permettant de produire le biométhane à partir de biomasse ligneuse comme le bois ; un procédé dit de Power-to-gaz, utilisant l'électrolyse de l'eau pour produire de l'hydrogène, qu'on injecte ensuite en petite proportion directement dans le réseau de gaz, ou qu'on combine avec du CO₂ pour obtenir du méthane. Une troisième génération à partir de microalgues est également envisagée à plus long terme [78].

Le bioGNV étant de composition quasi-identique à celle du gaz naturel, on estime son contenu énergétique à 13,78 kWh/kg.

Nous considérons dans cette étude comparative que le bioGNV est de génération 1, et que sa biomasse source est exploitée de manière durable (pas de changement d'affectation des sols). Nous retenons par convention des émissions à la combustion nulles (le carbone émis n'étant pas fossile).

Par contre, les phases amonts de production du bioGNV induisent des émissions qui augmentent l'effet de serre, qu'on peut estimer à 134 gCO₂/kWh PCI [78].

Le coût de production du biométhane dépend du type de site de production, de la nature des intrants et de la capacité de production du site (effets d'échelle). On peut ainsi estimer que la production de biométhane coûte actuellement en France entre 60 € (grandes installations) et 120 €/MWh PCI (petites installations) [78].

d. L'hydrogène par électrolyse

L'hydrogène peut être produit par électrolyse. Il s'agit de la réaction chimique inverse de celle qui a lieu dans une PAC : un courant électrique circule entre deux électrodes, dans un milieu contenant de l'eau (l'électrolyte), ce qui dissocie l'hydrogène et l'oxygène de l'eau. L'hydrogène peut alors être récupéré et purifié.

Par électrolyse, le bilan carbone de la production d'hydrogène est meilleur qu'avec le vaporeformage. On peut en effet estimer qu'il faut consommer 4 à 5 kWh d'électricité pour produire 3 kWh PCI d'hydrogène dans les installations industrielles [79]. Cela correspond à des émissions dues à la production d'électricité de 75 à 95 gCO₂/kWh PCI (pour le mix électrique français).

Le coût de cette production dépend beaucoup du temps annuel de production, car les dépenses en capital sont importantes, et du prix de l'électricité. On peut donner une fourchette large pour ce coût de production : entre 210 € et 560 €/MWh PCI.

II. Les caractéristiques des véhicules

Afin de réaliser les fiches de caractéristiques des véhicules, nous avons collecté un ensemble d'informations pour chaque véhicule. Nous présentons dans un premier temps notre méthodologie de collecte.

A. Notre méthodologie d'obtention des chiffres

1. Quelles données avons-nous collecté ?

a. Des données sur les caractéristiques techniques, les possibilités d'usage et les impacts des véhicules

Nous avons collecté des données sur un ensemble de caractéristiques techniques (la masse, la puissance mécanique, la consommation d'énergie par kilomètre parcouru), de possibilités d'usage (la portée du véhicule avec un plein de vecteur énergétique) et d'impacts (émissions de CO₂, prise d'espace au sol, coûts).

Voici des précisions sur la nature de ces informations :

- La *masse* représente la masse en ordre de marche du véhicule, c'est-à-dire le véhicule avec tous ses équipements, accessoires et le plein de carburant. Cette définition s'oppose à la masse à vide, c'est-à-dire sans carburant (ou sans batterie, pour un véhicule électrique), et à la masse en charge, c'est-à-dire avec ses passagers ou son chargement. Nous l'avons exprimée en kg (ou en tonne pour les modes lourds : trains, métros, trams).
- La *puissance mécanique* représente la puissance²⁶ maximale que le moteur peut délivrer. Cette puissance maximale est atteinte pour une vitesse donnée et pour un régime moteur donné. Nous l'avons exprimée en kiloWatt (kW).
- La *consommation d'énergie unitaire* représente la consommation d'énergie du véhicule lui permettant de parcourir un kilomètre. Concrètement, elle se mesure par la quantité de vecteur énergétique qu'il faut remettre dans le réservoir (ou la batterie, pour un véhicule électrique) après avoir parcouru le kilomètre avec un plein, afin de réatteindre le plein (reremplir le réservoir ou la batterie). Autrement dit, on fait le plein du véhicule, on lui fait parcourir un kilomètre, et on mesure quelle quantité de vecteur énergétique il faut mettre pour refaire le plein.
En réalité, on fait parcourir au véhicule plusieurs kilomètres dans des conditions variées, afin de mesurer la consommation : pour les voitures ou VUL, le test était le New European Driving Cycle – NEDC – et est maintenant le Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedures – WLTP (voir **Encadré 3**). On généralise ensuite la consommation sur 100 km. Ainsi, elle s'exprime en L/100 km pour les carburants liquides, en kg/100km pour les carburants gazeux, en kWh/100 km pour l'électricité. On peut ramener toutes ces consommations à des kWh/100 km. C'est ce que nous avons fait, en utilisant des taux de conversion PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur, voir section I.B.). La section II.A.2. détaille le calcul de la consommation pour les différents véhicules.
- La *portée* représente la distance parcourue avec un « plein » (selon la consommation mesurée lors des tests, pour les véhicules individuels). La portée est donc définie lorsque la notion de « plein » est définie, c'est-à-dire lorsque le véhicule transporte sa propre source d'énergie. Ce n'est pas le cas des transports en communs alimentés par caténaires. La portée s'exprime en km.
- La *capacité de personnes* est le nombre de personnes que le mode peut contenir au maximum en utilisation normale. Il s'agit du nombre de places assises, sauf pour quelques transports en commun (bus urbains, tramways, trains), dans lesquels des personnes debout peuvent être transportées.
- La *capacité de biens* est le volume de bagage/marchandises que le mode peut contenir, si jamais c'est un mode qui peut être utilisé pour transporter des marchandises. Lorsque des données sont disponibles sur le volume du coffre (ou de la soute pour les bus), nous avons utilisé ces données. Pour les deux-roues motorisés, nous avons sommé les possibilités de rangement (coffre sous le siège, possibilité d'ajout de coffres arrières ou latéraux). Pour les cycles, nous avons également considéré les vélos-cargo dans la gamme de véhicules. Pour les autres modes, et en l'absence de données, nous avons effectué des calculs

²⁶ La puissance d'un moteur (exprimée en Watt) est la quantité d'énergie (en Joule) qu'il peut délivrer en une seconde. Elle se mesure en multipliant la vitesse de rotation du moteur par le couple qu'il délivre, c'est-à-dire par la force d'entraînement rotative que délivre le moteur.

en supposant que chaque passager peut transporter l'équivalent d'un bagage admissible en soute d'avion (c'est-à-dire, 25cm*35cm*55 cm). Le calcul se rapporte donc dans ce cas à la capacité de personnes du véhicule. Pour les VUL, nous avons reporté les données correspondant à l'agencement du véhicule pour transporter le plus grand volume possible (c'est-à-dire, en rabattant les sièges). La capacité de biens est exprimée en m³.

- Le *niveau de confort* est une description qualitative du confort du mode, tel qu'il pourrait être décrit par un usager (silencieux, contrôle de la température, possibilité de travailler...), et en comparaison avec la voiture essence ou diesel.
- Les *émissions de CO₂ unitaires* correspondent aux émissions de CO₂ pour parcourir un kilomètre. Nous les avons estimées avec plusieurs périmètres de comptage différents (voir section II.A.2.). Elles sont exprimées en gCO₂/v.km.
- *L'espace au sol à l'arrêt* décrit la surface occupée par le mode à l'arrêt (par exemple, en stationnement). Elle est calculée en multipliant la longueur par la largeur du véhicule (sans tenir compte des rétroviseurs). Elle s'exprime en m².
- *L'espace au sol en circulation* décrit la surface occupée par le mode en circulation, incluant la distance de sécurité de circulation entre deux véhicules. Pour ce calcul, nous avons supposé une vitesse moyenne d'usage de chaque véhicule, et considéré que la distance de sécurité (en m) correspond à la distance parcourue pendant 2 s à cette vitesse, c'est-à-dire : vitesse (km/h)*2/3,6. Nous avons aussi inclus une distance latérale de sécurité, que nous avons supposée de 0,5 m de chaque côté du véhicule. Ainsi, la formule de calcul de cette surface est :

$$S_{circ} = (L + 2 * d_{ls}) * (l + v_{usage} * 2/3,6)$$

Avec L la largeur du véhicule (sans les rétroviseurs), d_{ls} la distance latérale de sécurité, l la longueur, v_{usage} la vitesse représentative du véhicule (voir table ci-dessous).

Véhicules	Vitesse représentative
Voitures, motos, VUL, bus, scooters essence, Twizy	50 km/h
Cycles	20 km/h
VAE - EDP	25 km/h
Scooters électriques	40 km/h

Le métro (sous-terrain) et le transport (aérien) par câble ont été considérés comme ne prenant pas d'espace au sol. Pour les trains du réseau TER, une distance minimale entre deux trains de 1 500 m a été sélectionnée.

L'espace en circulation s'exprime en m².

- Le *coût à l'achat* décrit le prix TTC du mode pour son acheteur (prix d'un bus pour un opérateur de bus, par exemple). Il s'exprime en €.
- Le *coût énergie* décrit le prix de l'énergie alimentant le véhicule à l'usage, en €/100 km.

b. Des données représentant l'ensemble des modèles les plus vendus ces dernières années en France

Dans cette étude comparative, un véhicule est une catégorie rassemblant un ensemble de modèles. Pour chaque véhicule, nous avons recherché les données des chiffres de vente des 10 modèles les plus vendus en 2017 ou 2018 en France [80], [81].

Lorsque ces données étaient disponibles, nous avons effectué nos recherches sur ces 10 modèles. Nous nous sommes basés sur des sites compilant les caractéristiques techniques des véhicules [82]–[88], ou bien directement sur la documentation technique des véhicules par les constructeurs.

Lorsque ces données n'étaient pas disponibles (c'était le cas pour la famille des cycles et des EDP et les transports en commun), nous avons sélectionné arbitrairement des modèles utilisés en France (pour les cycles et les EDP [89]–[92]), ou bien nous nous sommes basés sur des données statistiques déjà compilées dans des rapports dédiés, pour les transports en commun [37], [93], [94].

Pour les TC et les modes actifs (marche, cycles, VAE), les données retenues tiennent compte des différents cas d'usage de ces modes (voir section II.1.2).

A partir de ces données nous avons construit les indicateurs suivants pour chaque caractéristique décrite dans la section précédente :

- La *valeur moyenne* de la caractéristique, c'est-à-dire l'ordre de grandeur à retenir s'il n'y en avait qu'un à garder (il est difficile de ne garder qu'une valeur, mais nous nous sommes forcés à le faire). Pour ce faire, nous avons convenu de deux options :
 - dans le cas où les chiffres de vente dans les dernières années étaient aisément disponibles, nous avons calculé la valeur moyenne en pondérant les valeurs caractéristiques de chaque modèle par leurs parts de vente (exemple : si 2 modèles ont été vendus en 2018, le premier à 70 % de parts de marché et le second à 30 %, et que la portée du premier est de 100 km, celle du second de 200 km, alors la portée moyenne est de $0,7*100+0,3*200 = 70+60=130$ km) ;
 - dans le cas où elles n'étaient pas disponibles, alors une moyenne arithmétique simple a été utilisée sur les modèles sélectionnés au hasard (dans notre exemple, la portée est alors de $(100+200)/2=150$ km).
 - Lorsque très peu de données étaient disponibles, nous avons tenté de collecter des données de rapports ayant déjà eux-mêmes obtenus des estimations sur les indicateurs que nous cherchons à informer.
- La *valeur minimale* est la plus petite valeur observée au sein des modèles (et types d'usage pour les TC et les modes actifs) d'un même véhicule.
- La *valeur maximale* est la plus grande valeur observée au sein des modèles (et types d'usage pour les TC et les modes actifs) d'un même véhicule.

Par exemple, en ce qui concerne la portée des voitures au GNV, la valeur moyenne est la moyenne des portées des 10 modèles les plus vendus en 2018, la valeur minimale est la plus petite portée au sein de cette offre (c'est-à-dire, la valeur correspondant au modèle qui a la plus petite portée), et la valeur maximale est la plus grande valeur dans cette offre. Ainsi, les voitures GNV ont en moyenne une portée²⁷ de 330 km, la plus petite portée est de 210 km (c'est la Fiat Fiorino, monospace), et la plus grande de 620 km (la Volkswagen Caddy Maxi, monospace).

Pour certains véhicules, nous n'avions pas de données sur les versions de carrosserie ou de motorisation vendues au sein d'un même modèle. Dans ce cas, nous avons choisi arbitrairement une version du modèle en question. Cela a une influence d'autant plus grande sur les résultats que les versions représentent des variations significatives (au sein du modèle) des caractéristiques que nous étudions. Par exemple, pour les VUL, certains modèles ont des versions de différentes tailles de chargement (par exemple, différentes versions de 5m³ à 11m³), influant significativement sur le volume de biens transportés, sur la masse, la consommation etc. Cependant, les valeurs minimales et maximales affichées dépendent peu de ces choix arbitraires, car des versions « grande taille » et des versions « petite taille » ont été incluses dans les chiffres.

2. Comment avons-nous calculé la consommation et les émissions de CO₂ des véhicules ?

Les données de consommation et d'émissions de CO₂ ne sont pas toujours facilement accessibles pour certains véhicules. Si les véhicules destinés aux particuliers ou indépendants (voitures, VUL, deux-roues) sont soumis à des homologations et à la publication des résultats, en termes de consommation d'énergie et d'émissions de CO₂, les autres ne le sont pas.

Concernant ceux qui le sont, ils subissent avant leur mise en vente un test visant à mesurer la consommation et diverses émissions de gaz d'échappement, dont le CO₂. Pour bien comprendre à quoi correspondent les valeurs obtenues, il est important de comprendre la procédure du test et son évolution. C'est l'objet de l'**Encadré 3**.

²⁷ Il s'agit ici de la portée obtenue en roulant uniquement avec le vecteur GNV, sachant que les voitures GNV ont également un réservoir essence pour augmenter leur autonomie.

Encadré 3 : Les tests de mesure de la consommation et des émissions polluantes, comparés aux conditions réelles de conduite

Les différents modèles de voitures et de VUL doivent passer un test avant leur mise sur le marché européen. Ce test vise à mesurer la consommation du modèle et ses émissions polluantes.

Entre 1973 et septembre 2018, le New European Driving Cycle (NEDC) était le test appliqué aux modèles à mettre sur le marché. Depuis lors, un nouveau test est appliqué, le Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedures (WLTP).

Les tests se mènent en deux phases distinctes :

- une première phase de calibration sur circuit, lors de laquelle on fait accélérer un véhicule du modèle à homologuer, puis on le laisse décélérer en roue libre. Cela permet d'en mesurer l'inertie, les forces de résistance au roulement et celles de résistance à l'air ;
- une seconde phase, en laboratoire (donc statique), lors de laquelle on mesure la consommation et les émissions de polluants grâce à des instruments de mesure en sortie de pot d'échappement. Le véhicule y roule sur des rouleaux qui simulent les résistances aux roulements et à l'air précédemment mesurées sur circuit, en fonction de la vitesse du véhicule. Pour le NEDC, on simulait ainsi un parcours de 11 km environ (appelé le « cycle »), avec des accélérations et décélérations, simulant la conduite dans un environnement urbain puis un environnement interurbain. Pour le WLTP, c'est un parcours de 35 km environ qui est simulé.

Le NEDC était critiqué pour son manque de réalisme et, par conséquent, pour l'écart grandissant qu'il y avait entre ce que les usagers des voitures constataient et ce qui était affiché par les constructeurs, en termes de consommation. En effet, les écarts de prix à la pompe étaient de plus en plus grands entre la réalité et ce à quoi l'utilisateur aurait pu s'attendre en lisant la documentation constructeur.

Des études ont alors cherché à quantifier l'écart entre la consommation en conditions réelles de conduite et la consommation mesurée lors du test NEDC [95], [96]. Elles ont procédé d'une part de manière théorique, en listant les paramètres qui sont différents entre la situation de conduite réelle et la situation de test, potentiellement sources d'écarts entre les consommations mesurées, puis en évaluant à quel point ces paramètres jouent sur la consommation. Elles ont d'autre part procédé d'une manière expérimentale, en mesurant la consommation en situation de conduite réelle sur un million de véhicules, et en la comparant à ce qu'on aurait obtenu en prenant les données constructeurs.

Les résultats furent sans appel : en moyenne en 2015, la consommation réelle était 42% plus élevée que la consommation en condition de test. Cet écart est en croissance continue depuis 2001, où il était de 9%, avant de passer à 28% en 2012, puis 42 % en 2015. Certains constructeurs affichaient des écarts plus conséquents que d'autres, Mercedes ayant le plus grand écart, de 54%. L'écart constaté expérimentalement s'expliquait en grande partie par les différents paramètres qui avaient été listés théoriquement.

Ces paramètres sont en fait des marges de manœuvre afférentes aux conditions de test qui peuvent être exploitées par le constructeur (légalement) de manière à réduire la consommation en conditions de test. Ces manipulations générant des différences entre la conduite réelle et la situation de test. Les voici :

- Lors de la première phase du test, en circuit, des pneus spécialement sélectionnés et préparés pour cette phase sont montés, et sont surgonflés pour réduire les forces de frottement de roulement ; le circuit routier est sélectionné dans le même objectif, ainsi que les conditions de températures et pression de l'air (moindre frottements aérodynamiques par température élevée et faible pression).
- Le cycle NEDC n'est pas représentatif des conditions de conduites normales. Les accélérations qu'il met en jeu, très douces, ne sont pas représentatives. Sa distance est de 11 km seulement, ne permettant pas de tester le comportement des véhicules hybrides rechargeables, dont le vecteur énergétique utilisé est fonction de la distance parcourue (voir section I.A.1.c.).
- Les équipements montés sur le modèle testé en laboratoire sont sélectionnés et/ou réglés pour optimiser le fonctionnement sur le cycle effectué. Ces équipements ne sont pas nécessairement représentatifs de ceux qui sont montés sur les modèles vendus. Par exemple, les rapports de vitesse peuvent être augmentés

pour optimiser la consommation. De même, le contrôle moteur peut être optimisé pour les conditions spécifiques du cycle de test.

- Certains équipements qui consomment de l'énergie sont déconnectés pendant le cycle (climatisation, ordinateur de bord), y compris parfois, l'alternateur permettant de recharger la batterie.
- Le véhicule est spécifiquement préparé pour les conditions de test, et n'est pas représentatif des véhicules du même modèle sur la route. Par exemple, la version la moins équipée est testée afin de réduire la masse du véhicule au maximum, et donc sa consommation. La lubrification est optimisée pour réduire les frottements, avec des lubrifiants particuliers. Le véhicule est optimalement rodé pour consommer moins.
- Les résultats de mesure affichés peuvent être la borne basse de la plage de tolérance des instruments de mesure.

L'exploitation de ces marges de manœuvre explique une grande partie de la baisse de consommation des véhicules affichée par les constructeurs dans les 10 dernières années (seuls 30 à 50 % de la baisse affichée se sont effectivement retrouvés dans les conditions réelles de conduite [95]).

Le NEDC a été remplacé en 2018 par le WLTP, dans une optique de standardisation mondiale et de meilleure représentativité des conditions réelles de conduite. Il produit des résultats sensiblement différents de ceux obtenus par le NEDC, de par sa meilleure représentativité d'un cycle de conduite réel. Les études précitées estiment cependant que certaines marges de manœuvre décrites pourront encore être exploitées, si bien qu'un écart d'environ 20 % devrait subsister dans un premier temps entre ces résultats et la consommation en condition de conduite réelle, avant de augmenter par un effet d'apprentissage, les constructeurs exploitant à nouveau de mieux en mieux les marges permises par le test WLTP.

Pendant quelques années, les résultats du test WLTP seront « traduits » en résultats du test NEDC pour éviter une rupture dans les mesures, le test WLTP donnant des résultats significativement plus élevés que le test NEDC.

Concernant les voitures électriques, et en l'absence d'étude poussée à ce sujet, on peut estimer qu'un écart d'environ 25 % de consommation existe entre les résultats NEDC et la conduite réelle, cet écart s'expliquant par un profil d'usage plus urbain en réalité que dans le NEDC [29], par l'usage d'équipements non activés durant les tests (notamment le chauffage, qui consomme pour une voiture électrique), ou par l'exploitation d'autres marges de manœuvre n'ayant pas trait à la motorisation thermique. Cette estimation a été confirmée, en ordre de grandeur : des premiers tests en situation réelle de conduite suggèrent qu'environ 20 % d'écart existent entre les résultats de tests WLTP et les conditions réelles de conduite par temps froid [97]. Nous supposons également un écart de 25 % pour les véhicules hydrogène.

Enfin, concernant les VHR, les écarts peuvent être encore plus drastiques, en fonction de l'usage qui en est fait, et notamment de la fréquence de recharge de la batterie. Comme nous l'avons décrit dans la section I.A.1.c., les hybrides rechargeables se comportent en première approximation comme des voitures électriques pures tant que la batterie est suffisamment chargée, puis comme des « mild hybrides » lorsque la batterie atteint un seuil bas de charge. Ainsi, au bout de 30 à 40 km²⁸ sans recharge, la voiture fonctionne comme une voiture alimentée seulement à l'essence. Le test NEDC étant effectué batterie chargée et ne durant que 11 km, l'hybride y fonctionne donc comme une électrique, la consommation d'essence étant alors secondaire et les émissions de CO₂ très réduites. Or, le marché des VHR est essentiellement dédié aux flottes d'entreprises (70 % du marché au Royaume-Uni), et il s'avère que leurs utilisateurs, peu incités à faire des économies de carburant, rechargent en fait rarement, voire jamais, la batterie. En conséquence, sur 1 500 véhicules testés en conditions réelles par le cabinet Miles Consultancy en 2017 sur les flottes anglaises, la consommation moyenne était de 7,2 L/100 km au lieu des 1,8 L/100 km affichés [98]. L'exemple de la Golf GTE de Volkswagen, dont la consommation affichée est de 1,5 L/100 km est parlant : elle a été testée par l'hebdomadaire Auto Plus à 3,6 L/100 km sur les 100 premiers kilomètres, puis à 6,9 L/100 km sur les suivants [99], soit jusqu'à 360 % d'écart avec la consommation affichée, en fonction de l'usage.

Comme expliqué dans l'**Encadré 3**, des écarts significatifs existent entre la consommation affichée par les constructeurs en sortie de test d'homologation, et la consommation observée en situation réelle de conduite. Ainsi,

²⁸ La portée moyenne que nous avons relevée sur la seule batterie est de 35 km si on exclut l'exception du BMW i3 REX qui fonctionne comme une voiture électrique pure mais avec un petit moteur thermique et un réservoir de 9 L d'essence.

dans notre étude comparative, un facteur correctif a été appliqué aux consommations obtenues par les tests officiels afin de mieux représenter la consommation en conditions réelles de conduites, pour les voitures, VUL, minibus²⁹, motos et scooters : +42 % de consommation pour les véhicules thermiques, et + 25% pour les véhicules électriques et hydrogène. Cela permet de mieux représenter les émissions de CO₂ en conditions réelles de conduite, ainsi que les coûts en carburant.

Lorsque les données d'émissions de CO₂ étaient disponibles, nous les avons validées par nos données d'émissions unitaires des vecteurs énergétiques consommés. Par exemple, si les données constructeur d'une voiture diesel annoncent une consommation de 3,9 L/100 km (i.e. $3,9 * 9,86 = 39$ kWh/100 km), nous avons vérifié que les annonces d'émissions de CO₂ ramenées au kilomètre (101 gCO₂/km) étaient proches des émissions dues à la combustion de 0,39 kWh de diesel (c'est-à-dire $0,39(\text{kWh/km}) * 254$ (gCO₂/kWh) = 98 gCO₂/km).

Les données d'émissions mesurées lors des tests et annoncées par les constructeurs sont dites « du réservoir à la roue » (*tank to wheel*, TTW en anglais). Elles correspondent aux émissions (éventuellement nulles) dues au processus de transformation de l'énergie alimentant le moteur (essence, diesel, électricité...)³⁰, en l'énergie mécanique de rotation des roues³¹ nécessaire au véhicule pour parcourir un kilomètre. Cette énergie provient généralement du réservoir, mais peut aussi être fournie par un système d'électrification ferroviaire (rail, caténaires) ou des mécanismes d'induction dans le cas de certains véhicules électriques.

Nous avons également calculé les émissions dites « du puit à la roue » (*well to wheel*, WTW en anglais). Ces émissions reflètent un périmètre plus large de comptage des émissions de CO₂, qui inclut les activités de production de l'énergie finale et son transport jusqu'au réservoir. Par exemple, pour l'essence, les activités d'extraction du carburant, son raffinage, son transport et sa distribution. Concernant les modes actifs, nous avons inclus les activités de production de la nourriture apportant l'énergie supplémentaire permettant le déplacement actif (voir **Encadré 4**).

Nous n'avons pas réalisé le bilan carbone « en cycle de vie » des différents véhicules (voir **Encadré 5** ci-dessous).

²⁹ Les données de consommation que nous avons obtenues pour les minibus étant celles du test NEDC pour les minibus de 8 places + celle du conducteur.

³⁰ Qu'on appelle usuellement « l'énergie finale » au sein du système énergétique

³¹ Appelée « l'énergie utile »

Encadré 4 : Quelle consommation et quelles émissions pour les modes « actifs » (à force musculaire) ?

Les modes actifs (la marche, les cycles, et le vélo à assistance électrique) requièrent une activité physique supérieure à ce qu'elle serait pour un passager de voiture ou de transport en commun. Cette activité supplémentaire correspond à un métabolisme légèrement accéléré (respiration accélérée, activité musculaire et cardiaque supérieure). C'est pour cela qu'on associe des effets positifs sur la santé à ces modes. En contrepartie, la respiration accélérée émet légèrement plus de CO₂ qu'au repos. L'augmentation d'activité correspond à une augmentation de dépense énergétique, qui provient d'une augmentation de consommation de nutriments (on « brûle les calories »), correspondant *in fine* à une augmentation d'ingestion de nourriture. Par analogie aux véhicules, il s'agit des émissions « du réservoir à la roue », qu'il faudrait appeler dans ce cas-là « de l'estomac à la jambe³² ». D'autre part, la production des aliments ingérés (agriculture, élevage, épandage d'engrais...) génère des émissions de GES. Toujours par analogie aux véhicules, ces émissions sont les émissions « du puits à la roue », qu'il faudrait appeler « du champ (ou de l'élevage) à la jambe ».

Pour calculer les émissions de CO₂ « TTW » dues aux modes actifs, nous nous sommes basés sur la formule suivante [100] :

$$E_{net} = (MET_{actif} - MET_{repos}) * t * m * E_{repos}$$

Avec E_{net} les émissions supplémentaires de l'activité,

MET_{actif} le métabolisme en activité, que nous avons pris égal à 3 pour la marche à pied, à 4 pour le VAE, et de 4 à 10 pour le vélo, en fonction de l'intensité de l'effort (de 16 km/h à 26 km/h).

MET_{repos} le métabolisme au repos, assis, qui vaut 1.

t la durée de l'activité, qui est la durée pour faire un kilomètre à la vitesse considérée : 5 km/h en marche, 20 km/h en VAE, et de 16 km/h à 26 km/h pour le vélo.

m la masse de la personne faisant l'activité, que nous avons prise égale à 75 kg,

E_{repos} les émissions de CO₂ en respirant au repos, assis (2,95 mLCO₂/kg/min).

Pour calculer les émissions de CO₂ « WTW », nous avons considéré différents régimes alimentaires :

- Un régime « bas carbone extrême », correspond à des pâtes nature, et dont le bilan est de 0,27 gCO₂/kcal ingérée ;
- Un régime « classique » (betterave, tagliatelles bolognaises, compote de pommes) dont le bilan est de 1,5 gCO₂/kcal ;
- Un régime « carboné » (concombres-crème, bœuf purée, tarte), dont le bilan est de 4,1 gCO₂/kcal.

L'énergie supplémentaire dépensée lors de l'activité a été calculée comme suit :

$$NRJ_{net} = (MET_{actif} - MET_{repos}) * t * m * NRJ_{repos}$$

Avec NRJ_{repos} le métabolisme de base, au repos, assis (4,18 kJ/kg/h).

Ainsi, en multipliant l'énergie supplémentaire dépensée par le bilan carbone du régime alimentaire, nous avons obtenu les émissions associées à la production de la nourriture alimentant l'activité. En y ajoutant les émissions « TTW », nous avons obtenu les émissions « WTW ».

³² En fonction des modes de métabolismes (anaérobie alactique, anaérobie lactique ou aérobie), les processus menant des nutriments au mouvement de la jambe diffèrent.

Encadré 5 : L'analyse en cycle de vie (ACV) : données carbone pour quelques véhicules

L'analyse en cycle de vie est une méthode d'estimation de différents impacts (sur l'environnement, ou sur la santé humaine) d'un service précisément défini, dus à l'ensemble des activités qu'il a fallu mener pour fournir ce service.

Ainsi, une ACV du transport d'une personne sur un kilomètre dans un véhicule donné inclurait les émissions de Gaz à effet de serre (GES) dues à la fabrication, à la maintenance, et à la gestion de la fin de vie dudit véhicule, ramenées au kilomètre parcouru, en plus de celles dues à l'usage du véhicule sur ce kilomètre. Certaines ACV incluent également les phases de construction et de maintenance des infrastructures support de ce véhicule. Afin de rapporter ces émissions au kilomètre parcouru, le bilan GES réalisé doit être divisé par une durée de vie kilométrique du véhicule.

Voici un tableau de quelques véhicules pour lesquels des données en ACV (sans les infrastructures) sont disponibles, qui fournit les ordres de grandeur des émissions de GES dues aux phases de production et de fin de vie [29], [101], [102].

Véhicule	Durée de vie (km)	Emissions production et fin de vie (gCO ₂ /km)
Citadine essence	150 000	37
Berline diesel	250 000	25
Citadine VHR	150 000	51
Citadine élec	150 000	53
Berline élec	250 000	54
Vélo	15 000	7
VAE	15 000	12
Scooter	50 000	10
Scooter élec	50 000	20
Bus diesel	1 000 000	110
Bus GNV	1 000 000	100

Ces données correspondent à des ACV réalisées dans le but de répondre chacune à une question bien précise, sur des modèles de véhicules précis. Elles dépendent beaucoup des procédés de production qui ont été pris en compte, et notamment du lieu de production et de l'énergie utilisée pour ces procédés. Elles dépendent également significativement des hypothèses de durée de vie kilométrique.

Pour les voitures, l'application Climobil (du Luxembourg Institute of Science and Technology) permet de comparer l'ACV de différents modèles thermiques et électriques en fonction de différents paramètres de mix électriques, de production des batteries, de masse des modèles...

B. Résultats : fiches synthétiques des données obtenues par véhicule

Pour chaque véhicule, nous avons compilé les données sous forme d'un tableau d'indicateurs qui se veut synthétique et simple de lecture.



Voiture essence

Caractéristiques techniques

Masse 1100 [950 à 1250] kg	Puissance mécanique 68 [50 à 96] kW (92 ch)	Consommation unitaire 66 [59 à 85] kWh/100km (7,2 L/100km)
--------------------------------------	---	--

Possibilités d'usage

Portée 670 [500 à 780] km	Vitesse de pointe 175 [160 à 190] km/h	Capacité personnes 5 [4 à 5] places
-------------------------------------	--	---

Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo électrique⁽⁴⁾ Impossible (31 pers)

Capacité biens 0,36 [0,22 à 0,52] m ³	Confort par rapport à une voiture thermique N/A
--	---

Système support	<ul style="list-style-type: none"> Réseau routier, stationnement (parkings, garages) Réseau de distribution d'essence (stations-services, camions-citernes), garagistes (maintenance, réparation), dépannage, assurances Règles de circulation, signalétique, auto-écoles, standards de sécurité
------------------------	--

Impacts

CO₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ : 170 [150 à 220]	gCO₂eq/vkm	Emprise au sol	
	→ Well to wheel ⁽²⁾ : 210 [180 à 270] Soit 31 fois plus qu'en vélo électrique ⁽⁴⁾			→ A l'arrêt : 7 [6 à 8]
	→ Bas carbone ⁽³⁾ : 95 [85 à 120] Avec fabrication et fin de vie : +37 gCO ₂ pour une citadine ⁽⁵⁾			→ En circulation : 90 [85 à 90] m ²
Coûts	Achat : 18 000 [8000 à 31000] € TTC	Energie en usage : 11 [10 à 14] € TTC/100 vkm		

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).

⁽⁵⁾ Ceci est une estimation tenant compte d'une hypothèse d'une durée de vie de 150 000 km. Voir l'Encadré 5 de l'étude complète.



Voiture diesel

Caractéristiques techniques

1180 [1080 à 1500] kg Masse	73 [55 à 110] kW Puissance mécanique (100 ch)	55 [49 à 62] kWh/100km Consommation unitaire (5,6 L/100km)
--	---	--

Possibilités d'usage

870 [750 à 1040] km Portée	180 [160 à 210] km/h Vitesse de pointe	5 [5 à 5] places Capacité personnes
---	---	--

CO₂ Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo électrique⁽⁴⁾ **Impossible (26 pers)**

0,38 [0,29 à 0,52] m³ Capacité biens	N/A Confort par rapport à une voiture thermique
--	---

Système support	<ul style="list-style-type: none"> Réseau routier, stationnement (parkings, garages) Réseau de distribution de diesel (stations-services, camions-citernes), garagistes (maintenance, réparation), dépannage, assurances Règles de circulation, signalétique, auto-écoles, standards de sécurité
------------------------	--

Impacts

CO₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ : 140 [120 à 160]	Emprise au sol	
	→ Well to wheel ⁽²⁾ : 180 [160 à 200] Soit 26 fois plus qu'en vélo électrique ⁽⁴⁾		→ A l'arrêt : 7 [7 à 8]
	→ Bas carbone ⁽³⁾ : 60 [54 à 68] Avec fabrication et fin de vie : +25 gCO ₂ pour une berline ⁽⁵⁾		→ En circulation : 90 [85 à 90]
gCO₂eq/vkm		m²	
Coûts	Achat : 21 000 [11000 à 37000] € TTC	Energie en usage : 8,3 [7,4 à 9,3] € TTC/100 vkm	

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).

⁽⁵⁾ Ceci est une estimation tenant compte d'une hypothèse d'une durée de vie de 250 000 km. Voir l'Encadré 5 de l'étude complète.



Voiture électrique

Caractéristiques techniques

Masse	1440 [1070 à 2130] kg	Puissance mécanique	43 [16 à 100] kW (58 ch)	Consommation unitaire	16 [14 à 24] kWh/100km
--------------	---	----------------------------	---	------------------------------	--

Possibilités d'usage

Portée	260 [120 à 490] km	Vitesse de pointe	145 [130 à 250] km/h	Capacité personnes	4 [2 à 5] places
CO₂	Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo électrique ⁽⁴⁾				1 pers

Capacité biens	0,34 [0,17 à 0,74] m³	Confort par rapport à une voiture thermique	Silencieux Temps de charge plus long
-----------------------	--	---	--

Système support	<ul style="list-style-type: none"> Réseau routier, stationnement (parkings, garages) Réseau électrique, bornes de recharge, garagistes (maintenance, réparation), dépannage, assurances Règles de circulation, signalétique, auto-écoles, standards de sécurité
------------------------	---

Impacts

CO₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ :	0 [0 à 0]	Emprise au sol		
	→ Well to wheel ⁽²⁾ :	9 [8 à 14] Equivalent au vélo électrique ⁽⁴⁾		→ A l'arrêt :	7 [5 à 10]
	→ Bas carbone ⁽³⁾ :	N/A N/A Avec fabrication et fin de vie ⁽⁵⁾ : +53 gCO ₂		→ En circulation :	87 [78 à 98] m²
		gCO₂eq/vkm			

Coûts	Achat : 48 000 [23000 à 140000] € TTC	Energie en usage : 2,8 [2,4 à 4,1] € TTC/100 vkm
--------------	--	---

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).

⁽⁵⁾ Ceci est une estimation pour une citadine tenant compte d'une hypothèse d'une durée de vie de 150 000 km ; valeur très proche pour une berline ayant une durée de vie de 250 000 km. Voir l'Encadré 5 de l'étude complète.



VHR* élec/essence

* Voiture hybride rechargeable

Caractéristiques techniques

Masse	1830 [1200 à 2310] kg	Puissance mécanique	160 [99 à 400] kW (220 ch)	Consommation unitaire	44* [15 à 96] kWh/100km
--------------	---	----------------------------	---	------------------------------	---

Possibilités d'usage

Portée	550 [360 à 780] km	Vitesse de pointe	210 [150 à 310] km/h	Capacité personnes	5 [4 à 7] places
---------------	--	--------------------------	--	---------------------------	--------------------------------------



Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo électrique⁽⁴⁾ **Impossible (13 pers)**

Capacité biens	0,38 [0,26 à 0,47] m³	Confort par rapport à une voiture thermique	Silencieux
-----------------------	--	--	-------------------

Système support	<ul style="list-style-type: none"> Réseau routier, stationnement (parkings, garages) Réseau de distribution de diesel (stations-services, camions-citernes), réseau électrique, bornes de recharge, garagistes (maintenance, réparation), dépannage, assurances Règles de circulation, signalétique, auto-écoles, standards de sécurité
------------------------	---

Impacts

CO₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ : 64* [0 à 240]	gCO₂eq/vkm	Emprise au sol	
	→ Well to wheel ⁽²⁾ : 89* [8 à 300] Soit 13 fois plus qu'en vélo électrique ⁽⁴⁾			→ A l'arrêt : 8 [7 à 10]
	→ Bas carbone ⁽³⁾ : 47* [8 à 140] Avec fabrication et fin de vie : +51 gCO ₂ pour une citadine ⁽⁵⁾			→ En circulation : 92 [88 à 99]

Coûts	Achat : 64 000 [37000 à 191000] € TTC	Energie en usage : 7,2* [3,3 à 19] € TTC/100 vkm
--------------	--	---

* Les valeurs moyennes sont calculées en sommant celles du vecteur électrique et celles du vecteur essence selon les résultats du test NEDC

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).

⁽⁵⁾ Ceci est une estimation tenant compte d'une hypothèse d'une durée de vie de 150 000 km. Voir l'Encadré 5 de l'étude complète.



Voiture GNV

Caractéristiques techniques

Masse	1330 [956 à 1670] kg	Puissance mécanique	77 [50 à 96] kW (100 ch)	Consommation unitaire	76 [57 à 96] kWh/100km
-------	--	---------------------	---	-----------------------	--

Possibilités d'usage

Portée	330 [210 à 620] km	Vitesse de pointe	180 [150 à 200] km/h	Capacité personnes	5 [4 à 7] places
--------	--	-------------------	--	--------------------	--------------------------------------

Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo électrique⁽⁴⁾ Impossible (28 pers)

Capacité biens	0,38 [0,19 à 0,79] m³	Confort par rapport à une voiture thermique	N/A
----------------	--	---	------------

Réseau routier, stationnement (parkings, garages)	Réseau de distribution de GNV (réseau gazier, stations-services), garagistes (maintenance, réparation), dépannage, assurances
Système support	Règles de circulation, signalétique, auto-écoles, standards de sécurité

Impacts

CO₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ : 140 [110 à 180]	Emprise au sol
	→ Well to wheel ⁽²⁾ : 180 [130 à 220] Soit 28 fois plus qu'en vélo électrique ⁽⁴⁾	
	→ Bas carbone ⁽³⁾ : 100 [76 à 130]	
gCO_{2eq}/vkm		→ A l'arrêt : 8 [6 à 9]
		→ En circulation : 89 [83 à 91]
		m²

Coûts	Achat : 23 000 [13000 à 31000] € TTC	Energie en usage : 6,1 [4,1 à 8,8] € TTC/100 vkm
-------	---	---

* Il s'agit de la portée avec le vecteur gaz uniquement, ces véhicules fonctionnant en bi-carburant avec l'essence

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).



Voiture GPL

Caractéristiques techniques

 Masse	1190 [865 à 1470] kg	 Puissance mécanique	74 [49 à 100] kW (100 ch)	 Consommation unitaire	73 [56 à 110] kWh/100km (11 L/100km)
--	--	--	--	--	---

Possibilités d'usage

 Portée	320 [260 à 510] km	 Vitesse de pointe	170 [140 à 200] km/h	 Capacité personnes	5 [4 à 7] places
---	--	--	--	---	--------------------------------------

 **CO₂** Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo électrique⁽⁴⁾ **Impossible (30 pers)**

 Capacité biens	0,38 [0,19 à 0,83] m³	 Confort par rapport à une voiture thermique	N/A
--	--	---	------------

 Système support	<ul style="list-style-type: none">  Réseau routier, stationnement (parkings, garages)  Réseau de distribution de GPL (stations-services, camions-citernes), garagistes (maintenance, réparation), dépannage, assurances  Règles de circulation, signalétique, auto-écoles, standards de sécurité
--	--

Impacts

 CO ₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ : 170 [130 à 260]	Emprise au sol 	
	→ Well to wheel ⁽²⁾ : 200 [150 à 310] Soit 30 fois plus qu'en vélo électrique ⁽⁴⁾		→ A l'arrêt : 8 [6 à 9]
	→ Bas carbone ⁽³⁾ : N/A N/A		→ En circulation : 93 [82 à 97] m²
 Coûts		gCO_{2eq}/vkm	
Achat : 13 000 [11000 à 23000] € TTC	Energie en usage : 9,1 [6,9 à 14] € TTC/100 vkm		

* Il s'agit de la portée avec le vecteur GPL uniquement, certains véhicules fonctionnant en bi-carburant avec l'essence

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).



Voiture hydrogène

Caractéristiques techniques

Masse	1840 [1810 à 1880] kg	Puissance mécanique	110 [100 à 120] kW (150 ch)	Consommation unitaire	32 [30 à 34] kWh/100km
-------	---	---------------------	--	-----------------------	--

Possibilités d'usage

Portée	430 [310 à 500] km	Vitesse de pointe	170 [160 à 180] km/h	Capacité personnes	5 [4 à 5] places
--------	--	-------------------	--	--------------------	--------------------------------------

CO₂ Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo électrique⁽⁴⁾ **Impossible (15 pers)**

Capacité biens

0,43
[0,33 à 0,54]
m³

Confort par rapport à une voiture thermique

- Silencieux

Réseau routier, stationnement (parkings, garages)

Réseau de production et distribution d'hydrogène (stations-services avec électrolyseurs), maintenance, dépannage, réparation, assurances

Règles de circulation, signalétique, auto-écoles, standards de sécurité

Impacts

CO₂ unitaire

→ Tank to wheel⁽¹⁾ : **0** [0 à 0]

→ Well to wheel⁽²⁾ : **81** [78 à 87]
Soit 15 fois plus qu'en vélo électrique⁽⁴⁾

→ Bas carbone⁽³⁾ : **28** [26 à 29]

gCO_{2eq}/vkm

Emprise au sol

→ A l'arrêt : **9** [8 à 9]

→ En circulation : **92** [89 à 94]

m²

Coûts

Achat : 63 000 [60000 à 79000] **€ TTC**

Energie en usage : 1,9* [1,4 à 2,6]* **€ TTC/100 vkm**

* Valeur hors taxe, pour de l'hydrogène par vaporeformage.

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).



VUL essence*

* Véhicule utilitaire léger essence (2 références seulement)

Caractéristiques techniques

1310 [1280 à 1320] kg Masse	80 [72 à 85] kW Puissance mécanique (110 ch)	83 [81 à 85] kWh/100km Consommation unitaire (9 L/100km)
--	--	--

Possibilités d'usage

640 [640 à 650] km Portée	170 [170 à 170] km/h Vitesse de pointe	4 [3 à 5] places Capacité personnes
--	---	--

CO₂ Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo électrique⁽⁴⁾ **Impossible (38 pers)**

2,9 [2,6 à 3,3] m³ Capacité biens	Equivalent à une voiture thermique Confort par rapport à une voiture thermique
---	--

	A Réseau routier, stationnement (parkings, garages) Réseau de distribution d'essence (stations-services, camions-citernes), garagistes (maintenance, réparation), dépannage, assurances Règles de circulation, signalétique, auto-écoles, standards de sécurité
--	--

Impacts

CO₂ unitaire → Tank to wheel ⁽¹⁾ : 210 [210 à 220] → Well to wheel ⁽²⁾ : 260 [250 à 270] Soit 38 fois plus qu'en vélo électrique ⁽⁴⁾ → Bas carbone ⁽³⁾ : 120 [120 à 120] gCO_{2eq}/vkm	Emprise au sol → A l'arrêt : 8 [8 à 8] → En circulation : 91 [90 à 91] m²
Coûts Achat : 22 000 [21000 à 23000] € TTC	Energie en usage : 14 [12 à 17] € TTC/100 vkm

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).



VUL* diesel

* Véhicule utilitaire léger

Caractéristiques techniques

 Masse	1680 [1320 à 2020] kg	 Puissance mécanique	90 [73 à 110] kW (120 ch)	 Consommation unitaire	76 [60 à 100] kWh/100km (7,7 L/100km)
--	---	--	--	--	--

Possibilités d'usage

 Portée	980 [870 à 1180] km	 Vitesse de pointe	160 [140 à 190] km/h	 Capacité personnes	4 [2 à 9] places
---	---	--	--	---	--------------------------------------

 **CO₂** Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo électrique⁽⁴⁾ **Impossible (36 pers)**

 Capacité biens	5,1 [2,0 à 12] m³
--	--

 Confort par rapport à une voiture thermique	Equivalent à une voiture thermique
---	---

 Système support	 Réseau routier, stationnement (parkings, garages)  Réseau de distribution de diesel (stations-services, camions-citernes), garagistes (maintenance, réparation), dépannage, assurances  Règles de circulation, signalétique, auto-écoles, standards de sécurité
--	---

Impacts

 CO ₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ : 190 [150 à 260]
	→ Well to wheel ⁽²⁾ : 240 [190 à 330] Soit 36 fois plus qu'en vélo électrique ⁽⁴⁾
	→ Bas carbone ⁽³⁾ : 83 [66 à 110]
gCO_{2eq}/vkm	

Emprise au sol	
→ A l'arrêt :	10 [8 à 12]
→ En circulation :	96 [90 à 103]
m²	

 Coûts	Achat : 32 000 [22000 à 45000] € TTC	Energie en usage : 11 [7,7 à 18] € TTC/100 vkm
--	---	---

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).



VUL* électrique

* Véhicule utilitaire léger

Caractéristiques techniques

 Masse	1490 [1430 à 1970] kg	 Puissance mécanique	53 [44 à 90] kW (73 ch)	 Consommation unitaire	21 [19 à 34] kWh/100km
--	---	--	--	--	--

Possibilités d'usage

 Portée	200 [100 à 240] km	 Vitesse de pointe	130 [90 à 140] km/h	 Capacité personnes	4 [2 à 5] places
 CO ₂	Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo électrique ⁽⁴⁾				2 pers

 Capacité biens	2,7 [1,0 à 17] m³
--	--

 Confort par rapport à une voiture thermique	Silencieux Temps de charge plus long
---	---

 Système support	<ul style="list-style-type: none">  Réseau routier, stationnement (parkings, garages)  Réseau électrique, bornes de recharge, garagistes (maintenance, réparation), dépannage, assurances  Règles de circulation, signalétique, auto-écoles, standards de sécurité
--	--

Impacts

 CO ₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ :	0	[0 à 0]
	→ Well to wheel ⁽²⁾ :	12	[11 à 20]
	Soit 2 fois plus qu'en vélo électrique ⁽⁴⁾		
	→ Bas carbone ⁽³⁾ :	N/A	N/A
gCO₂eq/vkm			

Emprise au sol	
→ A l'arrêt :	9 [8 à 13]
→ En circulation :	93 [90 à 104]
m²	

 Coûts	Achat : 27 000 [22000 à 79000]	Energie en usage : 3,7 [3,2 à 5,9]
	€ TTC	€ TTC/100 vkm

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).



VUL* GNV

* Véhicule utilitaire léger

Caractéristiques techniques

 Masse	1980 [1180 à 2200] kg	 Puissance mécanique	120 [51 à 140] kW (160 ch)	 Consommation unitaire	150 [83 à 170] kWh/100km
--	---	--	---	--	--

Possibilités d'usage

 Portée	300 [210 à 430] km	 Vitesse de pointe	160 [150 à 170] km/h	 Capacité personnes	3 [2 à 5] places
---	--	--	--	---	--------------------------------------

 **CO₂** Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo électrique⁽⁴⁾ **Impossible (50 pers)**

 Capacité biens	11 [2,2 à 14] m³
--	---

 Confort par rapport à une voiture thermique	Equivalent à une voiture thermique
---	---

 Système support	A Réseau routier, stationnement (parkings, garages) Réseau de distribution de GNV (réseau gazier, stations-services), garagistes (maintenance, réparation), dépannage, assurances Règles de circulation, signalétique, auto-écoles, standards de sécurité
--	--

Impacts

 CO ₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ : 270 [160 à 320]
	→ Well to wheel ⁽²⁾ : 330 [190 à 390] Soit 50 fois plus qu'en vélo électrique ⁽⁴⁾
	→ Bas carbone ⁽³⁾ : 190 [110 à 230]
gCO₂eq/vkm	

Emprise au sol	
→ A l'arrêt :	10 [7 à 11]
→ En circulation :	98 [86 à 101]
m²	

 Coûts	Achat : 39 000 [20000 à 46000] € TTC	Energie en usage : 12 [6,1 à 15] € TTC/100 vkm
--	---	---

** Il s'agit de la portée avec le vecteur gaz uniquement, ces véhicules fonctionnant en bi-carburant avec l'essence

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).



VUL* GPL

* Véhicule utilitaire léger, une seule référence pour ce véhicule

Caractéristiques techniques

 Masse	1200 kg	 Puissance mécanique	80 kW (110 ch)	 Consommation unitaire	89 kWh/100km (13 L/100km)
--	-------------------	--	-----------------------------	--	--

Possibilités d'usage

 Portée	260 km	 Vitesse de pointe	170 km/h	 Capacité personnes	5 places
---	------------------	--	--------------------	---	--------------------

 **CO₂** Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo électrique⁽⁴⁾ **Impossible (36 pers)**

 Capacité biens	3 m ³	 Confort par rapport à une voiture thermique	Equivalent à une voiture thermique
--	----------------------------	---	---

 Système support	 Réseau routier, stationnement (parkings, garages)	 Réseau de distribution de GPL (stations-services, camions-citernes), garagistes (maintenance, réparation), dépannage, assurances	 Règles de circulation, signalétique, auto-écoles, standards de sécurité
--	--	---	--

Impacts

 CO ₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ : 210 → Well to wheel ⁽²⁾ : 240 Soit 36 fois plus qu'en vélo électrique ⁽⁴⁾ → Bas carbone ⁽³⁾ : N/A	Emprise au sol 	→ A l'arrêt : 8 → En circulation : 88 m ²
 Coûts	Achat : 10 000 € TTC	Energie en usage : 11 € TTC/100 vkm	

** Il s'agit de la portée avec le vecteur GPL uniquement, certains véhicules fonctionnant en bi-carburant avec l'essence

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).



VUL hydrogène

* Véhicule utilitaire léger, une seule référence pour ce véhicule

Caractéristiques techniques

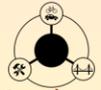
 Masse	1620 kg	 Puissance mécanique	44 kW (60 ch)	 Consommation unitaire	42 kWh/100km
--	-------------------	--	----------------------------	--	------------------------

Possibilités d'usage

 Portée	270 km	 Vitesse de pointe	130 km/h	 Capacité personnes	3 places
---	------------------	--	--------------------	---	--------------------

 ^{CO₂} Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo électrique⁽⁴⁾ **Impossible (20 pers)**

 Capacité biens	3,9 m ³	 Confort par rapport à une voiture thermique	Silencieux
--	------------------------------	---	------------

 Système support	 Réseau routier, stationnement (parkings, garages)
	 Réseau de production et distribution d'hydrogène (stations-services avec électrolyseurs), maintenance, dépannage, réparation, assurances
	 Règles de circulation, signalétique, auto-écoles, standards de sécurité

Impacts

 CO ₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ :	0	 Emprise au sol
	→ Well to wheel ⁽²⁾ :	110 Soit 20 fois plus qu'en vélo électrique ⁽⁴⁾	
	→ Bas carbone ⁽³⁾ :	37	
		gCO₂eq/vkm	
			→ A l'arrêt : 9
			→ En circulation : 92 m ²

 Coûts	Achat : 27 000 € TTC	Energie en usage : 2,5* € HT /100 vkm
--	--------------------------------	---

* Valeur hors taxe, pour de l'hydrogène par vaporeformage.

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).



Moto essence

Caractéristiques techniques

Masse 198 [124 à 365] kg	Puissance mécanique 58 [7 à 110] kW (79 ch)	Consommation unitaire 57 [26 à 81] kWh/100km (6,2 L/100km)
------------------------------------	---	--

Possibilités d'usage

Portée 280 [180 à 460] km	Vitesse de pointe 200 [110 à 250] km/h	Capacité personnes 2 [1 à 2] places
-------------------------------------	--	---

CO₂ Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo électrique⁽⁴⁾ **Impossible (26 pers)**

Capacité biens 0,005 [0,004 à 0,13] m ³	Confort par rapport à une voiture thermique Soumis aux conditions extérieures (températures, intempéries, bruits, bruit du moteur)
--	---

Système support	<ul style="list-style-type: none"> Réseau routier, stationnement (parkings, garages) Réseau de distribution d'essence (stations-services, camions-citernes), garagistes (maintenance, réparation), dépannage, assurances Règles de circulation, signalétique, auto-écoles, standards de sécurité
------------------------	--

Impacts

CO₂ unitaire gCO _{2eq} /vkm	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ : 140 [66 à 210]	Emprise au sol → A l'arrêt : 1,7 [1,1 à 2,2] → En circulation : 54 [51 à 61] m ²
	→ Well to wheel ⁽²⁾ : 180 [82 à 250] Soit 26 fois plus qu'en vélo électrique ⁽⁴⁾	
	→ Bas carbone ⁽³⁾ : 82 [38 à 120]	
Coûts	Achat : 9 300 [2200 à 33000] € TTC	Energie en usage : 9,6 [3,8 à 16] € TTC/100 vkm

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).



Moto électrique

Caractéristiques techniques

Masse 231 [89 à 280] kg	Puissance mécanique 36 [8 à 110] kW	Consommation unitaire 8,5 [4,8 à 11] kWh/100km (48 ch)
--	--	--

Possibilités d'usage

Portée 130 [50 à 210] km	Vitesse de pointe 130 [85 à 200] km/h	Capacité personnes 2 [1 à 2] places
CO₂ Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo végétarien ⁽⁴⁾		1

Capacité biens 0,005 [0,004 à 0,13] m³
--

Confort par rapport à une voiture thermique Soumis aux conditions extérieures (températures, intempéries, bruits)
--

Système support	<ul style="list-style-type: none"> Réseau routier, stationnement (parkings, garages) Réseau électrique, bornes de recharge, garagistes (maintenance, réparation), dépannage, assurances Règles de circulation, signalétique, auto-écoles, standards de sécurité
------------------------	---

Impacts

CO₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ : 0 [0 à 0]
	→ Well to wheel ⁽²⁾ : 5 [3 à 6] Soit 2 fois moins qu'un vélo végétarien ⁽⁴⁾
	→ Bas carbone ⁽³⁾ : N/A N/A
gCO_{2eq}/vkm	

Emprise au sol
→ A l'arrêt : 2,0 [1,2 à 2,1]
→ En circulation : 57 [50 à 58] m²

Coûts	Achat : 15 000 [7500 à 50000] € TTC	Energie en usage : 1,5 [0,8 à 1,9] € TTC/100 vkm
-------	--	---

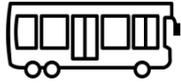
⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).



Bus urbain diesel

Caractéristiques techniques

Masse kg	Puissance mécanique 210 [180 à 270] kW (280 ch)	Consommation unitaire 350 [260 à 560] kWh/100km (35 L/100km)
--------------------	---	--

Possibilités d'usage

Portée 670 [520 à 830] km	Vitesse de pointe km/h	Capacité personnes 110 [83 à 160] places
CO₂ Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo végétarien ⁽⁴⁾		130 pers

Capacité biens 2,0 [1,4 à 2,6] m³

Confort par rapport à une voiture thermique	Ambiance partagée donc non contrôlée (sonore, température) Eventuelle station debout Temps utile (repos)
---	--

Système support	Réseau routier (possiblement voies et aménagements dédiés), réseau d'arrêts de bus
Réseau de distribution de diesel (camions-citernes), dépôts (stationnement, atelier, pompes diesel), réseaux d'informations sur les horaires et les lignes	Règles de circulation, signalétique, bus-écoles, standards de sécurité

Impacts

CO₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ : 880 [650 à 1400]
	→ Well to wheel ⁽²⁾ : 1100 [820 à 1800] Soit 130 fois plus qu'en vélo végétarien ⁽⁴⁾
	→ Bas carbone ⁽³⁾ : 380 [280 à 620] Avec fabrication et fin de vie ⁽⁵⁾ : +110 gCO ₂
gCO₂eq/vkm	

Emprise au sol
→ A l'arrêt : 37 [27 à 46]
→ En circulation : 150 [140 à 160]
m²

Coûts	Achat : 220 [200 à 240] k€ TTC	Energie en usage : 52 [33 à 98] € TTC/100 vkm
-------	---	--

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

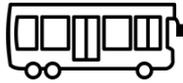
⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).

⁽⁵⁾ Ceci est une estimation tenant compte d'une hypothèse d'une durée de vie de d'un million de kilomètres. Voir l'Encadré 5 de l'étude complète.



Bus urbain élec

Caractéristiques techniques

 Masse	18000 [14500 à 19000] kg	 Puissance mécanique	200 [130 à 300] kW (270 ch)	 Consommation unitaire	120 [85 à 160] kWh/100km
--	--	--	--	--	--

Possibilités d'usage

 Portée	220 [120 à 280] km	 Vitesse de pointe	74 [70 à 85] km/h	 Capacité personnes	80 [75 à 90] places
 CO ₂	Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo végétarien ⁽⁴⁾			10 pers	

 Capacité biens	1,5 [1,3 à 1,8] m³
--	---

 Confort par rapport à une voiture thermique	Ambiance partagée donc non contrôlée (sonore, température) Moteur silencieux Eventuelle station debout Temps utile (repos)
---	---

 Système support	<p> Réseau routier (possiblement voies et aménagements dédiés), réseau d'arrêts de bus, éventuels dispositifs de recharge « en ligne »</p> <p> Réseau électrique, dépôts (stationnement, atelier, bornes de recharge), réseaux d'informations sur les horaires et les lignes</p> <p> Règles de circulation, signalétique, bus-écoles, standards de sécurité</p>
--	--

Impacts

 CO ₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ :	0 [0 à 0]	 Emprise au sol
	→ Well to wheel ⁽²⁾ :	68 [48 à 91] Soit 10 fois plus qu'en vélo végétarien ⁽⁴⁾	
	→ Bas carbone ⁽³⁾ :	N/A N/A	
gCO₂eq/vkm			→ A l'arrêt : 31
Coûts			→ En circulation : 140 m²
Achat : 500 [400 à 650] k€ TTC		Energie en usage : 26 [19 à 27] € TTC/100 vkm	

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).



Bus urbain GNV

Caractéristiques techniques

Masse kg	Puissance mécanique 220 kW [180 à 240] (300 ch)	Consommation unitaire 470 kWh/100km [370 à 580]
--------------------	---	--

Possibilités d'usage

Portée 410 km [350 à 500]	Vitesse de pointe km/h	Capacité personnes 110 places [83 à 160]
CO₂ Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo végétarien ⁽⁴⁾		130 pers

Capacité biens 1,7 m³ [0,9 à 2,5]

Confort par rapport à une voiture thermique	Ambiance partagée donc non contrôlée (sonore, température) Eventuelle station debout Temps utile (repos)
---	--

Système support	<p> Réseau routier (possiblement voies et aménagements dédiés), réseau d'arrêts de bus, éventuels dispositifs de recharge « en ligne »</p> <p> Réseau gazier, dépôts (stationnement, atelier, pompes GNV), réseaux d'informations sur les horaires et les lignes</p> <p> Règles de circulation, signalétique, bus-écoles, standards de sécurité</p>
-----------------	---

Impacts

CO₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ : 880 [700 à 1100]	Emprise au sol	
	→ Well to wheel ⁽²⁾ : 1100 [860 à 1300] Soit 130 fois plus qu'en vélo végétarien ⁽⁴⁾		→ A l'arrêt : 38 [30 à 45]
	→ Bas carbone ⁽³⁾ : 630 [500 à 780] Avec fabrication et fin de vie ⁽⁵⁾ : +100 gCO ₂		→ En circulation : 150 [140 à 160]
gCO₂eq/vkm		m²	
Coûts	Achat : 300 k€ TTC	Energie en usage : 38 € TTC/100 vkm [27 à 53]	

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).

⁽⁵⁾ Ceci est une estimation tenant compte d'une hypothèse d'une durée de vie de d'un million de kilomètres. Voir l'Encadré 5 de l'étude complète.



Autocar diesel

Caractéristiques techniques

 Masse	11700 [11700 à 11800] kg	 Puissance mécanique	220 [200 à 260] kW (300 ch)	 Consommation unitaire	280 [240 à 320] kWh/100km (28 L/100km)
--	--	--	--	--	---

Possibilités d'usage

 Portée	1300 [1200 à 1400] km	 Vitesse de pointe	55 [51 à 59] places
 CO ₂ Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo électrique ⁽⁴⁾		Impossible (130 pers)	
 Capacité biens	5,9 [5,2 à 6,9] m³	 Confort par rapport à une voiture thermique	Ambiance partagée donc non contrôlée (sonore, température) Temps utile (travail, repos)

 Système support	 Réseau routier (possiblement voies et aménagements dédiés), réseau d'arrêts de bus	 Réseau de distribution de diesel (camions-citernes), dépôts (stationnement, atelier, pompes diesel), réseaux d'informations sur les horaires et les lignes	 Règles de circulation, signalétique, bus-écoles, standards de sécurité
--	---	---	---

Impacts

 CO ₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ : 700 [610 à 800] → Well to wheel ⁽²⁾ : 890 [780 à 1000] Soit 130 fois plus qu'en vélo électrique ⁽⁴⁾ → Bas carbone ⁽³⁾ : 300 [260 à 350] gCO₂eq/vkm	Emprise au sol  → A l'arrêt : 32 [31 à 34] → En circulation : 140 [140 à 150] m²
 Coûts	Achat : 190 [180 à 200] k€ TTC	Energie en usage : 42 [31 à 55] € TTC/100 vkm

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).



Minibus diesel

Caractéristiques techniques

 Masse	2000 [1800 à 2200] kg	 Puissance mécanique	92 [70 à 120] kW (130 ch)	 Consommation unitaire	87 [80 à 110] kWh/100km (8,8 L/100km)
--	---	--	--	--	--

Possibilités d'usage

 Portée	1100 [920 à 1600] km	 Vitesse de pointe	160 [150 à 160] km/h	 Capacité personnes	10 [8 à 18] places
---	--	--	--	---	--

 **CO₂** Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo électrique⁽⁴⁾ **Impossible (42 pers)**

 Capacité biens	1,1 [1,0 à 3,8] m³	 Confort par rapport à une voiture thermique	Ambiance partagée donc non contrôlée (sonore, température) Temps utile (travail, repos)
--	---	---	--

 **Système support**

-  Réseau routier (possiblement voies et aménagements dédiés), réseau d'arrêts de bus
-  Réseau de distribution de diesel (camions-citernes), dépôts (stationnement, atelier, pompes diesel), réseaux d'informations sur les horaires et les lignes
-  Règles de circulation, signalétique, bus-écoles, standards de sécurité

Impacts

 CO ₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ : 160 [150 à 200]	gCO_{2eq}/vkm	 Emprise au sol
	→ Well to wheel ⁽²⁾ : 200 [180 à 240] Soit 42 fois plus qu'en vélo électrique ⁽⁴⁾		
	→ Bas carbone ⁽³⁾ : 67 [62 à 82]		
	→ A l'arrêt : 15 [13 à 17]		
	→ En circulation : 110 [98 à 130]		m²

 Coûts	Achat : 38 000 [32000 à 47000] € TTC	Energie en usage : 9,2 [7,2 à 13] € TTC/100 vkm
--	---	--

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).



Minibus électrique*

* Une seule référence pour ce véhicule

Caractéristiques techniques

Masse kg	Puissance mécanique 80 kW (110 ch)	Consommation unitaire 26 kWh/100km
-----------------	--	---

Possibilités d'usage

Portée 190 km	Vitesse de pointe 120 km/h	Capacité personnes 7 places [6 à 7]
----------------------	-----------------------------------	---

CO₂ Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo végétarien⁽⁴⁾ **2 pers**

Capacité biens **0,87 m³**
[0,87 à 2,9]

Confort par rapport à une voiture thermique
Ambiance partagée donc non contrôlée (sonore, température)
Moteur silencieux
Temps utile (travail, repos)

Système support

- Réseau routier (possiblement voies et aménagements dédiés), réseau d'arrêts de bus, éventuels dispositifs de recharge « en ligne »
- Réseau électrique, dépôts (stationnement, atelier, bornes de recharge), réseaux d'informations sur les horaires et les lignes
- Règles de circulation, signalétique, bus-écoles, standards de sécurité

Impacts

CO₂ unitaire

→ Tank to wheel⁽¹⁾ : **0**

→ Well to wheel⁽²⁾ : **12**
Soit 2 fois plus qu'en vélo végétarien⁽⁴⁾

→ Bas carbone⁽³⁾ : **N/A**

gCO_{2eq}/vkm

Emprise au sol

→ A l'arrêt : **10 m²**

→ En circulation : **97 m²**

Coûts

Achat : 43 000 € TTC

Energie en usage : 3,5 € TTC/100 vkm

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).



Métro

Caractéristiques techniques

Masse	100 [28 à 140] t	Puissance mécanique	1000 [520 à 2000] kW (1400 ch)	Consommation unitaire	1000 [390 à 2000] kWh/100km
--------------	--------------------------------------	----------------------------	---	------------------------------	---

Possibilités d'usage

Portée	N/A N/A km	Vitesse de pointe	78 [70 à 80] km/h	Capacité personnes	400 [160 à 700] places
CO₂	Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo végétarien⁽⁴⁾				70 pers

Capacité biens	6,4 [2,6 à 11] m³
-----------------------	--

Confort par rapport à une voiture thermique	Ambiance partagée donc non contrôlée (sonore, température) Eventuelle station debout Temps utile (repos)
---	--

Système support	Réseau ferré, réseau de stations sous-terrains Réseau électrique d'alimentation, dépôts (stationnement, atelier, lavage...), réseaux d'informations sur les horaires et lignes Règles de circulation, signalétique
------------------------	--

Impacts

CO₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ : 0 [0 à 0] → Well to wheel ⁽²⁾ : 570 [220 à 1100] Soit 70 fois plus qu'en vélo végétarien ⁽⁴⁾ → Bas carbone ⁽³⁾ : N/A N/A gCO_{2eq}/vkm	Emprise au sol → A l'arrêt: 0 [0 à 0] → En circulation: 0 [0 à 0] m²
--------------------------------	--	--

Coûts	Achat: 5 [4 à 9] million(s) € TTC	Energie en usage: 170 [70 à 340] € TTC/100 vkm
--------------	--	---

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocultures pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).



Tramway

Caractéristiques techniques

 Masse	48 [44 à 50] t	 Puissance mécanique	660 [550 à 720] kW (900 ch)	 Consommation unitaire	140 [130 à 180] kWh/100km
--	-----------------------------	--	---	--	--

Possibilités d'usage

 Portée	N/A N/A km	 Vitesse de pointe	70 [70 à 80] km/h	 Capacité personnes	220 [130 à 340] places
 CO ₂	Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo végétarien ⁽⁴⁾			10 pers	

 Capacité biens	3,5 [2,0 à 5,5] m ³
--	---

 Confort par rapport à une voiture thermique	Ambiance partagée donc non contrôlée (sonore, température) Eventuelle station debout Temps utile
---	--

 Système support	 Réseau ferré, réseau de stations
	 Réseau électrique d'alimentation, dépôts (stationnement, atelier, lavage...), réseaux d'informations sur les horaires et lignes
	 Règles de circulation, signalétique

Impacts

 CO ₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ : 0 [0 à 0]	 Emprise au sol
	→ Well to wheel ⁽²⁾ : 80 [71 à 110] Soit 10 fois plus qu'en vélo végétarien ⁽⁴⁾	
	→ Bas carbone ⁽³⁾ : N/A N/A	
	gCO_{2eq}/vkm	→ A l'arrêt : 75 [51 à 110]
		→ En circulation : 200 [160 à 240] m²

 Coûts	Achat : 2,0 [1,5 à 2,6] million(s) € TTC	Energie en usage : 24 [21 à 31] € TTC/100 vkm
--	--	---

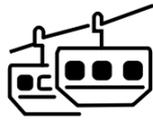
⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).



Transport aérien par câble

Caractéristiques techniques

 Masse	?* kg	 Puissance mécanique	640 kW (870 ch)	 Consommation unitaire	?* [17 à 180] kWh/100km
--	----------	--	-----------------------	--	-------------------------------

Possibilités d'usage

 Portée	3 [1 à 6] km	 Vitesse de pointe	22 [18 à 29] km/h	 Capacité personnes	[10 à 200] places
---	--------------------	--	-------------------------	---	----------------------

 **CO₂** Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo végétarien⁽⁴⁾ **1 à 12 pers**

 Capacité biens	?* [0,2 à 3,2] m ³	 Confort par rapport à une voiture thermique	Ambiance partagée donc non contrôlée (sonore, température) Eventuelle station debout Temps utile
--	-------------------------------------	---	--

 Système support	 Infrastructure aérienne à câbles, stations	 Réseau électrique, atelier de maintenance, réparation, lavage, réseaux d'informations sur les horaires et lignes	 Standards de sécurité
--	---	---	--

Impacts

 CO ₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ :	0	[0 à 0]	Emprise au sol 			
	→ Well to wheel ⁽²⁾ :	?*	[10 à 100]		→ A l'arrêt :	0	[0 à 0]
	→ Bas carbone ⁽³⁾ :	N/A	N/A		→ En circulation :	0	[0 à 0]
gCO_{2eq}/vkm			m²				

 Coûts	Achat : 300** [30 à 1000] k€ HT	Energie en usage : ?* [2,9 à 30] € TTC/100 vkm
--	------------------------------------	---

* Variabilité entre les différents systèmes de transport par câble trop grande pour donner une moyenne qui ait du sens
** Valeur hors taxe d'une cabine sans les infrastructures

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).



Train TER* électrique

* Transport express régional

Caractéristiques techniques

 Masse	160 [130 à 190] t	 Puissance mécanique	2500 [1800 à 3200] kW (3400 ch)	 Consommation unitaire	900 [500 à 1300] kWh/100km
--	---------------------------------------	--	--	--	--

Possibilités d'usage

 Portée	N/A N/A km	 Vitesse de pointe	180 [160 à 200] km/h	 Capacité personnes	300 [160 à 1300] places
 CO ₂	Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo électrique ⁽⁴⁾			80 pers	
 Capacité biens	14 [7,9 à 63] m³	 Confort par rapport à une voiture thermique	Ambiance partagée donc non contrôlée (sonore, température) Eventuelle station debout Espaces dédiés vélos, prises électriques Silencieux, temps utile (travail, repos)		
 Système support	Réseau ferré, réseau de stations Réseau électrique d'alimentation, dépôts (stationnement, atelier, lavage...), réseaux d'informations sur les horaires et lignes Règles de circulation, signalétique				

Impacts

 CO ₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ :	0 [0 à 0]	 Emprise au sol		
	→ Well to wheel ⁽²⁾ :	500 [290 à 740] Soit 80 fois plus qu'en vélo électrique ⁽⁴⁾		→ A l'arrêt :	300 [210 à 410]
	→ Bas carbone ⁽³⁾ :	N/A N/A		→ En circulation :	4400 m²
		gCO_{2eq}/vkm			
 Coûts	Achat :	11 [8,0 à 13] million(s) € TTC	Energie en usage :	220 [86 à 310] € TTC/100 vkm	

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).



Train TER* diesel

* Transport express régional

Caractéristiques techniques

 Masse	160 [150 à 220] t	 Puissance mécanique	2400 [2000 à 2700] kW (3200 ch)	 Consommation unitaire	1500 [990 à 2000] kWh/100km (1500 L/100km)
-----------	---------------------------------------	-------------------------	--	---------------------------	---

Possibilités d'usage

 Portée	N/A N/A km	 Vitesse de pointe	160 [160 à 160] km/h	 Capacité personnes	200 [160 à 1000] places
------------	--------------------------------	-----------------------	--	------------------------	---

CO₂ Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo électrique⁽⁴⁾ **700 pers**

Capacité biens **9,7**
[7,8 à 48]
m³

Confort par rapport à une voiture thermique
Ambiance partagée donc non contrôlée (sonore, température)
Eventuelle station debout
Espaces dédiés vélos, prises électriques
Silencieux, temps utile (travail, repos)

Système support

- Réseau ferré, réseau de stations
- Réseau de distribution du diesel (camions-citernes), dépôts (stationnement, atelier, lavage...), réseaux d'informations sur les horaires et lignes
- Règles de circulation, signalétique

Impacts

CO₂ unitaire

→ Tank to wheel⁽¹⁾ : **3800** [2500 à 5000]

→ Well to wheel⁽²⁾ : **4800** [3200 à 6300]
Soit 700 fois plus qu'en vélo électrique⁽⁴⁾

→ Bas carbone⁽³⁾ : **1600** [1100 à 2200]

gCO_{2eq}/vkm

Emprise au sol

→ A l'arrêt : **240** [160 à 310]

→ En circulation : **4400**
m²

Coûts

Achat : 8,3 million(s) € TTC

Energie en usage : 220 [130 à 340] € TTC/100 vkm

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.
NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).



Marche à pied

Caractéristiques techniques

 Masse	0 [0 à 0] kg	 Puissance mécanique	0 [0 à 0] kW	 Consommation unitaire	0,03 kWh/100km
--	----------------------------------	--	----------------------------------	--	---------------------------------

Possibilités d'usage

 Portée	N/A km	 Vitesse de pointe	6 km/h	 Capacité personnes	1 place
---	-------------------------	--	-------------------------	---	--------------------------

 **CO₂** Nombre "d'occupants" pour émettre moins qu'un vélo végétarien⁽⁴⁾ **Impossible (2 pers)**

 Capacité biens	0,01 m³	 Confort par rapport à une voiture thermique	Soumis aux conditions extérieures (températures, intempéries, bruits) Effort physique (modéré)
--	-------------------------------------	---	---

 Système support	 Trottoirs	 Règles de circulation, passages piétons, signalisation
--	--	---

Impacts

 CO ₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ :	10	gCO_{2eq}/vkm	 Emprise au sol	→ A l'arrêt :	0,38
	→ Well to wheel ⁽²⁾ :	55 [18 à 132] Soit 2 fois plus qu'en vélo végétarien ⁽⁴⁾			→ En circulation :	2 m²
	→ Bas carbone ⁽³⁾ :	N/A N/A				
 Coûts	Achat :	0 € TTC	Energie en usage :	N/A € TTC/100 vkm		

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).



Cycles classiques*

* A force musculaire uniquement

Caractéristiques techniques

Masse	15 [10 à 50] kg	Puissance mécanique	0,1 kW (0,1 ch)	Consommation unitaire	0,016 [0,016 à 0,028] kWh/100km
--------------	-------------------------------------	----------------------------	-------------------------------------	------------------------------	---

Possibilités d'usage

Portée	5,3 [5,3 à 7,3] km	Vitesse de pointe	27 [15 à 30] km/h	Capacité personnes	1 [1 à 3] places
---------------	--	--------------------------	---------------------------------------	---------------------------	--------------------------------------

CO₂ Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo végétarien⁽⁴⁾ **N/A**

Capacité biens

0,03
[0,00 à 0,08]
m³

Confort

Soumis aux conditions extérieures (températures, intempéries, bruits)

Effort physique (modéré)
par rapport à une voiture thermique



Bandes ou pistes cyclables, double-sens cyclables, stationnement sécurisé

Services de réparation, maintenance, assurance, réseau d'information sur les infrastructures

Règles de circulation, signalétique, vélo-écoles

Impacts

CO₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ :	5	[5 à 9]	Emprise au sol		
	→ Well to wheel ⁽²⁾ :	26	[8 à 110] ...		→ A l'arrêt :	1,2 [1,2 à 1,4]
	→ Bas carbone ⁽³⁾ :	N/A	N/A		→ En circulation :	23 [23 à 23]
gCO₂eq/vkm				m²		



Coûts

Achat : 420 [360 à 2100]
€ TTC

Energie en usage : N/A

€ TTC/100 vkm

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).

⁽⁵⁾ Ceci est une estimation tenant compte d'une hypothèse d'une durée de vie de 15 000 km. Voir l'Encadré 5 de l'étude complète.



VAE-EDP*

* Vélos à assistance électrique – Engins de déplacement personnels

Caractéristiques techniques

 Masse	25 [5 à 50] kg	 Puissance mécanique	0,1 [0,03 à 0,4] kW (0,1 ch)	 Consommation unitaire	0,67 [0,48 à 0,91] kWh/100km
--	------------------------------------	--	---	---	--

Possibilités d'usage

 Portée	60 [20 à 90] km	 Vitesse de pointe	25 [18 à 39] km/h	 Capacité personnes	1 [1 à 2] places
 CO ₂	Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo électrique ⁽⁴⁾			N/A	

 Capacité biens	0,03 [0,00 à 0,08] m³
--	--

 Confort par rapport à une voiture thermique	Soumis aux conditions extérieures (températures, intempéries, bruits) Effort physique (faible)
---	---

 Système support	 Bandes ou pistes cyclables, double-sens cyclables, stationnement sécurisé
 Réseau électrique, services de réparation, maintenance, assurance, réseau d'information sur les infrastructures	 Règles de circulation, signalétique, vélo-écoles

Impacts

 CO ₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ :	3	[0 à 4]
	→ Well to wheel ⁽²⁾ :	17	[0 à 49]
	→ Bas carbone ⁽³⁾ :	N/A	N/A
Avec fabrication et fin de vie ⁽⁵⁾ : +12 gCO ₂ pour un VAE			
gCO₂eq/vkm			

Emprise au sol	
→ A l'arrêt :	1,2 [0,5 à 1,4]
→ En circulation :	27 [22 à 27]
m²	

 Coûts	Achat : 600 [400 à 3700] € TTC	Energie en usage : N/A € TTC/100 vkm
--	---	---

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).

⁽⁵⁾ Ceci est une estimation pour un VAE tenant compte d'une hypothèse d'une durée de vie de 15 000 km. Voir l'Encadré 5 de l'étude complète.



Scooter essence

Caractéristiques techniques

Masse 166 [99 à 238] kg	Puissance mécanique 16 [8 à 40] kW (22 ch)	Consommation unitaire 38 [28 à 69] kWh/100km (4,2 L/100km)
-----------------------------------	--	--

Possibilités d'usage

Portée 280 [170 à 400] km	Vitesse de pointe 120 [100 à 160] km/h	Capacité personnes 2 [2 à 2] places
-------------------------------------	--	---

CO₂ Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo végétarien⁽⁴⁾ **Impossible (14 pers)**

Capacité biens 0,01 [0,01 à 0,06] m ³	Confort par rapport à une voiture thermique Soumis aux conditions extérieures (températures, intempéries, bruits, bruit du moteur) Bruyant
--	--

Système support	<ul style="list-style-type: none"> Réseau routier, stationnement (parkings, garages) Réseau de distribution d'essence (stations-services, camions-citernes), garagistes (maintenance, réparation), dépannage, assurances Règles de circulation, signalétique, auto-écoles, standards de sécurité
------------------------	--

Impacts

CO₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ : 97 [70 à 180]	Emprise au sol	
	→ Well to wheel ⁽²⁾ : 120 [86 à 220] Soit 14 fois plus qu'en vélo végétarien ⁽⁴⁾		→ A l'arrêt : 1,6 [1,4 à 1,7]
	→ Bas carbone ⁽³⁾ : 55 [40 à 100] Avec fabrication et fin de vie ⁽⁵⁾ : +10 gCO ₂		→ En circulation : 53 [52 à 53]
	gCO₂eq/vkm	m²	

Coûts	Achat : 6 100 [2400 à 13000] € TTC	Energie en usage : 6,5 [4,0 à 14] € TTC/100 vkm
--------------	---	--

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).

⁽⁵⁾ Ceci est une estimation tenant compte d'une hypothèse d'une durée de vie de 50 000 km. Voir l'Encadré 5 de l'étude complète.



Scooter électrique

Caractéristiques techniques

Masse 99 [66 à 130] kg	Puissance mécanique 3,1 [0,8 à 6,4] kW (4 ch)	Consommation unitaire 5,1 [1,9 à 9,5] kWh/100km
----------------------------------	---	---

Possibilités d'usage

Portée 50 [35 à 70] km	Vitesse de pointe 53 [40 à 95] km/h	Capacité personnes 2 [1 à 2] places
Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo végétarien⁽⁴⁾		1 pers

Capacité biens 0,01 [0,01 à 0,06] m ³
--

Confort par rapport à une voiture thermique	Soumis aux conditions extérieures (températures, intempéries, bruits)
---	---

Système support	<ul style="list-style-type: none"> Réseau routier, stationnement (parkings, garages) Réseau électrique, bornes de recharge, garagistes (maintenance, réparation), dépannage, assurances Règles de circulation, signalétique, auto-écoles, standards de sécurité
------------------------	---

Impacts

CO₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ :	0 [0 à 0]
	→ Well to wheel ⁽²⁾ :	3 [1 à 5]
	→ Bas carbone ⁽³⁾ :	N/A N/A
Avec fabrication et fin de vie ⁽⁵⁾ : +20 gCO ₂		
gCO₂eq/vkm		

Emprise au sol	
→ A l'arrêt :	1,4 [1,1 à 1,7]
→ En circulation :	42 [40 à 45] m ²

Coûts	Achat : 4 700 [1000 à 12000] € TTC	Energie en usage : 0,9 [0,3 à 1,6] € TTC/100 vkm
--------------	---	---

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).

⁽⁵⁾ Ceci est une estimation tenant compte d'une hypothèse d'une durée de vie de 50 000 km. Voir l'Encadré 5 de l'étude complète.



Voiturette (Twizy)

* Une seule référence pour ce véhicule

Caractéristiques techniques

Masse	474 kg	Puissance mécanique	13 kW (18 ch)	Consommation unitaire	7,9 kWh/100km
--------------	------------------	----------------------------	----------------------------	------------------------------	-------------------------

Possibilités d'usage

Portée	80 km	Vitesse de pointe	80 km/h	Capacité personnes	2 places
CO₂	Nombre d'occupants pour émettre moins qu'un vélo végétarien ⁽⁴⁾				1 pers
Capacité biens	0,03 m ³	Confort	par rapport à une voiture thermique Soumis à certaines conditions extérieures (températures, bruits)		

Système support	<ul style="list-style-type: none"> Réseau routier, stationnement (parkings, garages) Réseau électrique, bornes de recharge, garagistes (maintenance, réparation), dépannage, assurances Règles de circulation, signalétique, auto-écoles, standards de sécurité
------------------------	---

Impacts

CO₂ unitaire	→ Tank to wheel ⁽¹⁾ :	0	gCO_{2eq}/vkm	Emprise au sol		
	→ Well to wheel ⁽²⁾ :	4			→ A l'arrêt :	2,8
	→ Bas carbone ⁽³⁾ :	N/A			→ En circulation :	66
				m²		
Coûts	Achat : 11 000	€ TTC	Energie en usage : 1,4	€ TTC/100 vkm		

⁽¹⁾ "Tank to Wheel", c'est-à-dire « du réservoir à la roue », désigne les émissions dues à la conversion de l'énergie disponible dans le véhicule (réservoir, batterie, muscle), dite « énergie finale », en l'énergie dite « utile » permettant au véhicule de fonctionner.

⁽²⁾ "Well to wheel", c'est-à-dire « du puits à la roue », désigne les émissions TTW auxquelles on ajoute les émissions dues à la production de l'énergie disponible dans le véhicule (« énergie finale ») : par exemple l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole, la production de l'électricité ou la nourriture du cycliste. Pour ce qui concerne la production électrique, cette mesure est bien sûr très dépendante de l'intensité carbone du mix électrique.

NB : Toutes les données fournies ici correspondent au mix électrique français, faiblement « carboné » par rapport au mix moyen européen, à cause de la prépondérance de la production d'énergie nucléaire et renouvelable.

⁽³⁾ désigne les émissions « du puits à la roue » dans le cas où on utilise un substitut « bas carbone ». Selon les cas : les agrocarburants pour l'essence, le diesel et le GNV ; l'hydrogène par électrolyse pour l'hydrogène.

⁽⁴⁾ Si le véhicule est plutôt destiné aux distances courtes, nous le comparons à un vélo conduit par une personne végétarienne (« vélo végétarien »). S'il peut parcourir des distances longues, nous le comparons à un vélo à assistance électrique (« vélo électrique »).

C. Limitations dans l'interprétation des données

1. Des valeurs moyennes qui représentent un parc moyen de véhicules vendus en 2018, pour les véhicules individuels motorisés

Les données obtenues pour les véhicules individuels motorisés, comme exposé dans la partie II.A.1., représentent des données statistiques telles que mesurées dans les ventes de l'année 2018. Elles ne représentent donc pas forcément des caractéristiques inhérentes aux véhicules étudiés. Par exemple, la masse moyenne des VUL GNV est la plus élevée des VUL. Or, cette tendance à une masse plus élevée n'est pas spécifiquement dû au fait que le véhicule est alimenté au GNV ; c'est plus certainement dû au fait qu'en tendance, le parc des VUL de grande taille (donc plus lourds) vendu contient plus de motorisation GNV que le parc des VUL de petite taille. Autrement dit, il existe des VUL au GNV aussi légers que les plus légers des autres VUL (comme le montre la borne inférieure des masses des VUL GNV), mais ces derniers sont moins représentés dans le parc vendu en 2018.

Ainsi, en première approche (mais voir la section suivante) **les valeurs minimales et maximales peuvent s'interpréter comme représentant la plage existante des véhicules du type considéré, et la valeur moyenne peut s'interpréter comme les tendances de ventes** au sein de cet ensemble.

2. Des valeurs minimales et maximales ne reflétant pas forcément l'ensemble des conceptions possibles

Etant donné que nous avons recueilli les données sur les statistiques de vente, elles sont représentatives des véhicules... qui se vendent. Or, ce qui se vend n'est pas forcément représentatif de l'ensemble des conceptions possibles pour les véhicules considérés, ni même l'ensemble des conceptions « optimales ». En particulier, **les véhicules dépeints dans cette étude comparative, représentatifs des ventes, ne sont pas forcément optimaux dans leur catégorie en termes de consommation ou d'émissions de CO₂** (ces objectifs n'étant pas forcément ceux qui pilotent les marchés automobiles). Des conceptions visant particulièrement ces objectifs pourraient être significativement plus efficaces que les véhicules réellement vendus.

Par exemple, le marché des VHR vise particulièrement le marché des voitures de fonction haut de gamme et puissantes, tout en obtenant les bonus écologiques de par leur hybridation et l'exploitation efficace des conditions de test de mesure des émissions (voir **Encadré 3**). Ainsi, il apparaît que ce type de voitures est le plus lourd et le plus rapide de toutes les voitures, ce qui n'est pas, en soit, une caractéristique inhérente à la VHR. Autrement dit, des VHR plus légères et moins puissantes pourraient être conçues, mais les marchés ne s'intéressent pas (actuellement) à ces conceptions.

3. Des valeurs n'intégrant pas toujours les dernières avancées technologiques

Même si les valeurs obtenues sont basées sur les véhicules neufs vendus en 2018, **certaines technologies « novatrices » peuvent ne pas se retrouver dans les données collectées, étant donné que nous avons adopté un « seuil de coupure » aux 10 modèles les plus vendus de chaque véhicule**. Ainsi, si les véhicules contenant des avancées technologiques particulières ne se vendent pas encore beaucoup, elles n'apparaîtront pas dans les résultats. Par exemple, les voitures hybrides « classiques » (non rechargeables) sont incluses dans cette étude comparative dans la catégorie des voitures essence, ou diesel, mais n'apparaissent pas dans les résultats car aucun de ces véhicules ne s'est assez vendu en 2018 pour être dans le top 10 des ventes.

4. Des valeurs ne tenant pas compte des cas concrets d'usage

Cette étude comparative renseigne des valeurs « moyennes » sur l'ensemble des usages des véhicules. Typiquement, pour les voitures et VUL, nous avons retenu les valeurs de consommation « mixte » des tests d'homologation, c'est-à-dire celle supposées décrire les performances moyennes en conduite en partie dans des zones urbaines (consommation plus élevée) et en partie sur des voies plus rapides (consommation moins élevée). La consommation des bus dépend essentiellement de leur vitesse commerciale, intégrant un certain nombre de caractéristiques de l'usage du bus, tels que la densité de circulation, le nombre d'arrêts (pour déposer/embarquer des passagers ou imposés par l'environnement), ou la topographie : plus la vitesse commerciale est élevée, plus la consommation de carburant est faible [103]. La plage de consommation retenue dans cette étude comparative pour les bus représente la plage d'usages possibles.

Ainsi, les valeurs retenues dans cette étude comparative ne sont pas forcément représentatives si on cherche à étudier un cas d'usage spécifique (par exemple : rouler uniquement dans l'urbain dense congestionné, ou bien rouler uniquement sur autoroute fluide). Elles ne doivent donc pas être utilisées directement pour comparer finement deux véhicules qui assureraient un usage bien particulier. Par exemple, pour comparer la performance d'un autocar diesel qui assure une liaison interurbaine sur voie rapide à celle qu'aurait une voiture essence pour le même service requiert de collecter des données spécifiques à ce cas d'usage (ex : une vitesse stable à 100 km/h sur la majeure partie du trajet).

5. Comment et pourquoi utiliser ces valeurs ?

Pour les voitures, deux-roues motorisés et VUL, les valeurs de consommation et d'émissions que nous proposons dans cette étude comparative représentent les caractéristiques des véhicules vendus en France en 2018 en usage mixte (c'est-à-dire moyennant un usage urbain et un usage interurbain). Ainsi, la variabilité des données représente la diversité des modèles vendus.

Pour les transports en commun, les valeurs de cette étude comparative représentent les caractéristiques du parc français selon des usages variés. Ainsi, la variabilité des données représente à la fois la diversité des modèles vendus (par exemple, différentes tailles de bus ou de trains) et la diversité des environnements d'exploitation de ces véhicules (de l'urbain dense congestionné à l'interurbain fluide).

Pour les petits véhicules individuels utilisant la force musculaire, les valeurs représentent les caractéristiques des véhicules du parc français selon des usages variés. Ainsi, la variabilité des données représente la diversité des modèles (par exemple, différents EDP et différents VAE) et la diversité des usages (effort faible à effort intense). Voir l'**Encadré 6** pour plus de détails.

Ce choix de calcul mène à certaines limitations, si bien que **nos valeurs doivent être maniées avec précaution.** Elles ne devraient pas être utilisées telles qu'elles pour décider quel véhicule est le plus efficace pour assurer un service précis. Ni pour décider dans quelle direction impulser (ou stopper) les incitations au développement de tel ou tel type de véhicule à l'échelon national. Ni pour indiquer que tel ou tel type de véhicule ne pourra jamais être plus efficace qu'un autre si on décidait de le rendre plus efficace.

Nos valeurs ont plutôt vocation à informer sur les ordres de grandeur et sur les grands enjeux sous-jacents à la mise en place d'un système de mobilité donné. En effet, le choix même des caractéristiques présentées n'est pas neutre : il nous semble important de prendre en considération les enjeux de masse, de puissance, de consommation, d'émissions de CO₂, de prise d'espace au sol, de coûts, et de possibilités d'usage dans l'évaluation d'un choix de système de mobilité. Les ordres de grandeur présentés permettent alors d'orienter les réflexions en fonction des besoins de mobilité sur chaque territoire : qui doit transporter quoi, qui doit transporter combien de personnes, à quelle vitesse, sur quelle distance, avec quel budget, dans un environnement contraint en espace ou non, etc. Mais **ces besoins de mobilité doivent être collectés et analysés en premier lieu, avant de faire des choix propres à la conception du système de mobilité qui y répondra le mieux.** Les valeurs proposées peuvent donc servir pour les grands choix de préfiguration, qui doivent être affinés par la collecte de données plus précises sur les véhicules pressentis, en lien avec les besoins effectivement collectés du territoire.

Encadré 6 : Pourquoi les émissions en WTW de la marche à pied sont-elles supérieures à celles de la voiture électrique dans cette étude comparative ?

Comme expliqué dans l'**Encadré 4**, les émissions en WTW de la marche et des modes actifs doivent tenir compte de la manière dont on produit la nourriture apportant l'énergie alimentant l'effort supplémentaire dû au déplacement avec ce mode, comparé à un déplacement effectué en restant assis (par exemple, un déplacement en voiture). On mesure donc *a priori* les émissions générées lors de la production de la nourriture qui a été utilisée pour alimenter l'effort supplémentaire de déplacement. Cependant, il est impossible en pratique d'associer un repas en particulier à cet effort supplémentaire. On suppose donc qu'un *régime moyen* alimente l'effort supplémentaire permettant le déplacement.

Les calculs montrent un effet prépondérant du régime alimentaire, et du mode de production de la nourriture, dans les émissions en WTW des modes actifs. Ainsi, **un régime faiblement carboné³³ permet des déplacements actifs 7 fois moins carbonés qu'un régime fortement carboné.**

Les émissions en WTW de la voiture électrique prennent en compte la manière dont on produit l'électricité. L'électricité française, produite en 2018 à 72 % par des centrales nucléaires, à 12 % par des centrales hydroélectriques, à 9 % par des renouvelables (éolien, solaire, bioénergies), et seulement 7 % par des moyens thermiques fossiles est très peu carbonée [104]. A titre de comparaison, le facteur d'émissions du mix français est de 57 gCO₂/kWh, contre 420 gCO₂/kWh pour le mix moyen de l'Union Européenne (UE) [70].

Ainsi, **un déplacement en voiture électrique rechargée en France est 7 fois moins carboné que le même déplacement effectué par une voiture électrique fictive qui se serait rechargée dans tous les pays de l'UE.**

On voit donc que le fait que les émissions WTW de la marche sont supérieures à celles de la voiture électrique dans cette étude comparative est hautement dépendant aux situations spécifiques considérées, l'erreur de comparaison pouvant être d'un facteur 50 entre deux situations.

On ne peut donc pas conclure dans l'absolu qu'un déplacement devrait être fait en VE plutôt qu'en marche à pied pour réduire les émissions, mais que :

- **Notre alimentation joue beaucoup sur le bilan carbone des modes actifs.** Il importe donc, pour ces modes, de réduire le bilan carbone de cette alimentation, par une modification des habitudes alimentaires et des modes de production de nos aliments.
- **Le mix électrique joue beaucoup sur le bilan carbone de la voiture électrique.** Il importe donc, pour ce véhicule, de réduire le bilan carbone du mix électrique en évitant l'usage de centrales thermiques fossiles.
- En France, tant que les modes de production des aliments restent inchangés, tant que le mix électrique reste peu carboné, et pour des habitudes alimentaires modérément carbonées, la voiture électrique est effectivement moins carbonée que la marche à pied.

Par ailleurs, **la consommation d'énergie de la marche à pied est 500 fois moindre que celle de la VE, allant de pair avec une consommation globale de ressources plusieurs ordres de grandeur inférieure à celle de la VE.**

³³ Par exemple, en tenant compte des modes de production actuels de la nourriture, un régime faiblement carné et/ou de saison

III. Quelques éléments de comparaison collective entre les différents modes

Les ordres de grandeur obtenus pour chaque véhicule permettent d'opérer de multiples comparaisons qui peuvent être utiles à la prise de décision pour orienter un système de mobilité à l'échelle locale, en fonction des spécificités du territoire et de ses activités.

Sur certains aspects, visualiser l'ensemble des données permet également de fournir une vue d'ensemble sur les véhicules, et donc des pistes de réflexions sur la conception des véhicules en eux-mêmes vis-à-vis des besoins de mobilité. L'objet de cette partie est de fournir quelques visualisations qui nous ont semblées intéressantes, et de soulever des questionnements à partir de ces visualisations.

A. Croiser les véhicules aux usages pour concevoir un système de mobilité qui réponde aux besoins de manière efficiente

Il importe de bien cerner les besoins de mobilité d'un territoire avant de proposer des solutions permettant de répondre à ces besoins, a fortiori lorsqu'on se donne un objectif de décarbonation, et/ou de moindre consommation d'énergie. Le Guide pour une mobilité quotidienne bas carbone, et le rapport Décarboner la mobilité dans les zones de moyenne densité, tous deux portés par *The Shift Project*, proposent une approche selon la logique Avoid-Shift-Improve : il s'agit dans un premier temps de réfléchir aux moyens permettant de limiter le nombre de déplacements (urbanisme, télétravail, livraison des achats...), avant de réfléchir aux moyens d'effectuer les déplacements.

Lorsqu'un déplacement est jugé désirable, les solutions marient alors invariablement des considérations sur les véhicules et leur usage. On parle ainsi de report modal (changer d'usage en passant d'un mode de transport à un autre), d'augmentation des taux de remplissage (changer l'usage d'un véhicule en y transportant plus de personnes), de situation de conduite (incluant l'éco-conduite, c'est-à-dire changer l'usage d'un véhicule en le pilotant différemment), de changement de motorisation (passer d'un véhicule alimenté par un vecteur énergétique à un véhicule alimenté par un autre vecteur énergétique), ou d'efficacité énergétique (incluant des améliorations technologiques pour réduire la consommation à véhicule équivalent, ou encore des aspects de réduction du dimensionnement du véhicule pour répondre au même besoin tout en consommant moins).

Notre étude, comme souligné dans la partie II.C., ne permet pas de croiser les véhicules à un style de conduite, ou à une morphologie de trajet particulière. Elle ne donne pas non plus d'information sur l'efficacité énergétique au sein d'une famille de véhicules. Dans notre étude, ces informations se retrouvent agrégées dans la plage de variabilité des différents modèles, mais nous ne fournissons pas les informations à l'échelon du modèle particulier de véhicule pour expliquer cette variabilité entre les différents modèles (exemple : est-ce dû à la taille, à la puissance, à l'usage différent des modèles, qu'ils consomment ou émettent plus ?).

Notre étude permet cependant de **comparer les véhicules avec des taux de remplissage différents**. Bien entendu, plus un véhicule est rempli, plus sa consommation et ses émissions de CO₂ sont réduites ramenées aux nombre de passagers. C'est l'objet des Figure 4 et Figure 5.

La Figure 4 représente la consommation énergétique de quelques modes de transport de personnes en fonction de leur taux de remplissage. On y constate que les petits modes à dominante musculaire (marche à pied, famille des cycles et VAEs) ont une consommation énergétique négligeable par rapport aux autres modes : quelques centaines de Watt par 100 km, quand les scooters électriques, les trains électriques pleins et les bus urbains pleins en consomment environ 2 000 par personne transportée. Les autres véhicules, même pleins, consomment encore plus, les motos, scooters et voitures thermiques ayant les plus grandes consommations des véhicules pleins.

On constate qu'un passager de voiture thermique pleine (5 personnes) consomme en ordre de grandeur la même énergie que seul en voiture électrique, qu'en minibus diesel au moins mi-plein ou qu'en train diesel mi-plein. Il consomme environ deux fois plus qu'en train électrique mi-plein, qu'en train diesel plein, qu'en car diesel plein ou qu'en scooter électrique. Il consomme enfin 15 à 800 fois plus qu'en petit mode individuel à force musculaire...

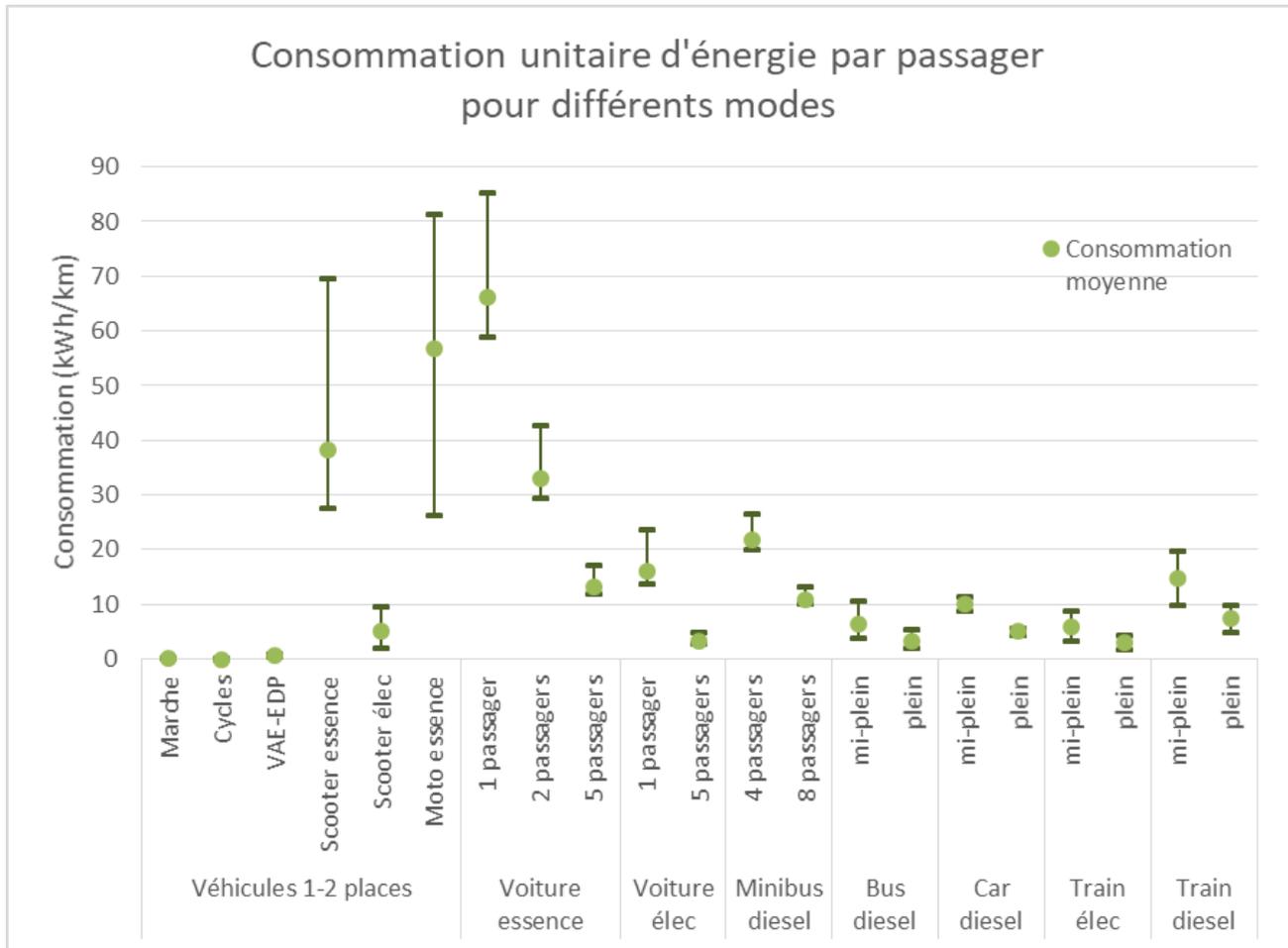


Figure 4 : Consommation unitaire d'énergie par passager pour différents véhicules et différents taux de remplissage. Valeurs moyennes et plages de variabilité.

La Figure 5 représente les émissions du puits à la roue des différents véhicules pour différents taux de remplissage. Cette métrique complexifie le tableau en tenant compte du caractère carboné ou non du vecteur énergétique de chaque mode. Ainsi, les véhicules thermiques (qui roulent aux combustibles fossiles : voitures, bus, cars, deux roues motorisés ou trains, thermiques) conservent le positionnement relatif qu'ils avaient en termes de consommation d'énergie. Par contre, les véhicules électriques (ici, les voitures et scooters) voient leurs émissions très largement réduites par rapport à la position qu'ils avaient en termes de consommation d'énergie, car le mix électrique français est peu carboné. Au contraire, les modes mus par la force musculaire (marche, cycles, VAE) « fonctionnent » avec une source d'énergie carbonée (la nourriture, fonction du régime alimentaire, mais dans tous les cas telle que consommée et telle que produite/importée en France), si bien que leurs émissions relatives sont élevées par rapport à l'énergie qu'ils consomment (voir **Encadré 6**).

L'ajout d'ordres de grandeur des émissions de CO₂ dues aux phases de production et de fin de vie des véhicules nuance encore ces constats. Ces ordres de grandeur modifient significativement le bilan pour les véhicules massifs qui transportent peu de personnes (les voitures) car le bilan des phases de production n'est pas amorti sur beaucoup de personnes ni sur beaucoup de kilomètres, comparé aux bus et cars. Il modifie également significativement le bilan du scooter électrique, ce dernier émettant très peu en usage à cause du caractère décarboné du mix électrique français.

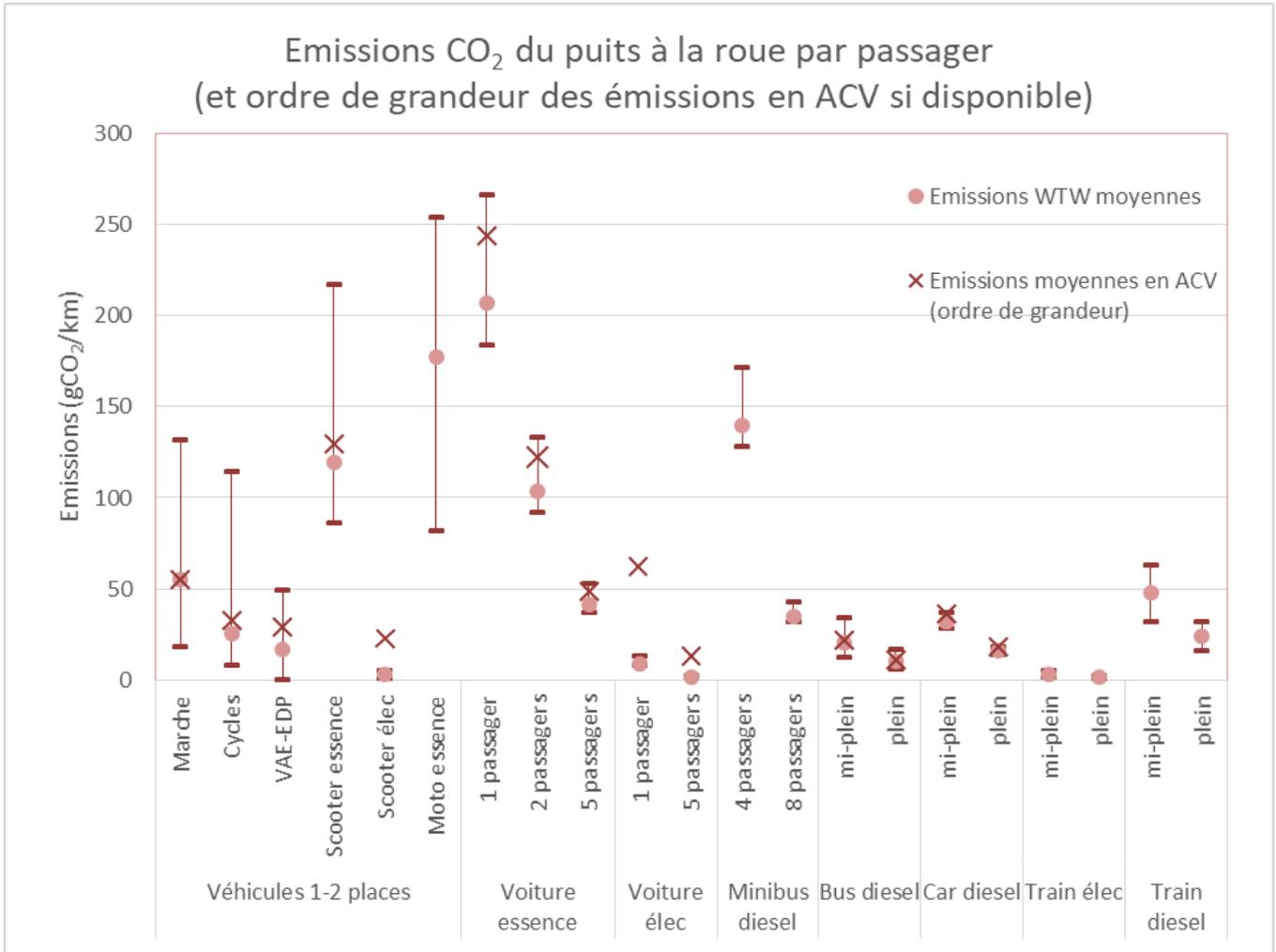


Figure 5 : Emissions unitaires de CO₂ du puits à la roue par passager, pour différents véhicules et différents taux de remplissage. Les ronds rosés représentent les valeurs moyennes ; les barres représentent les plages de variabilité autour de la valeur moyenne ; les croix rouges représentent en ordre de grandeur les émissions en ACV, lorsque des données étaient disponibles.

Clé de lecture : une personne seule utilisant une voiture essence émet entre 180 gCO₂/km et 270 gCO₂/km respectivement pour le modèle le moins émissif, et le plus émissif, des 10 modèles de voitures essence les plus vendus en 2018. En utilisant la voiture essence « moyenne » des 10 modèles de voitures essence les plus vendus, il émet 210 gCO₂ (rond rosé). En tenant compte des émissions dues aux phases de fabrication et de fin de vie de la voiture, il émet en ordre de grandeur moyen 210 gCO₂/km + 35 gCO₂/km = 245 gCO₂/km (croix rouge).

B. La consommation des véhicules en fonction de leur masse

Nous avons également trouvé intéressant de comparer les véhicules selon leur consommation unitaire et leur masse.

1. La consommation par kilomètre (à vide)

Dans un premier temps, nous avons comparé les véhicules selon leur consommation unitaire « à vide », c'est-à-dire leur consommation par véhicule.kilomètre (voir Figure 6, Figure 7 et Figure 8).

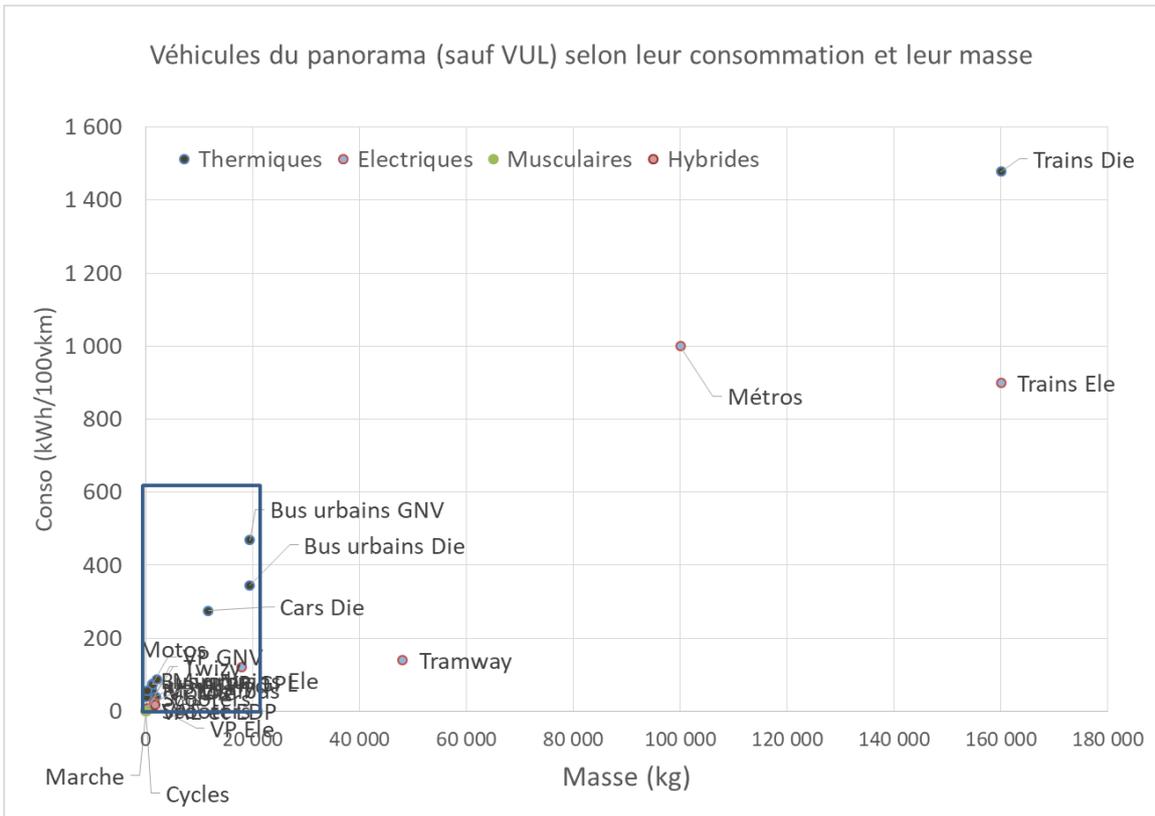


Figure 6 : Véhicules de l'étude (sauf VUL), selon leur masse et leur consommation unitaire (en kWh/v.km). Die = diesel ; Ele = électrique. Le cadre bleu fait l'objet d'un zoom, représenté dans la figure suivante (Figure 7).

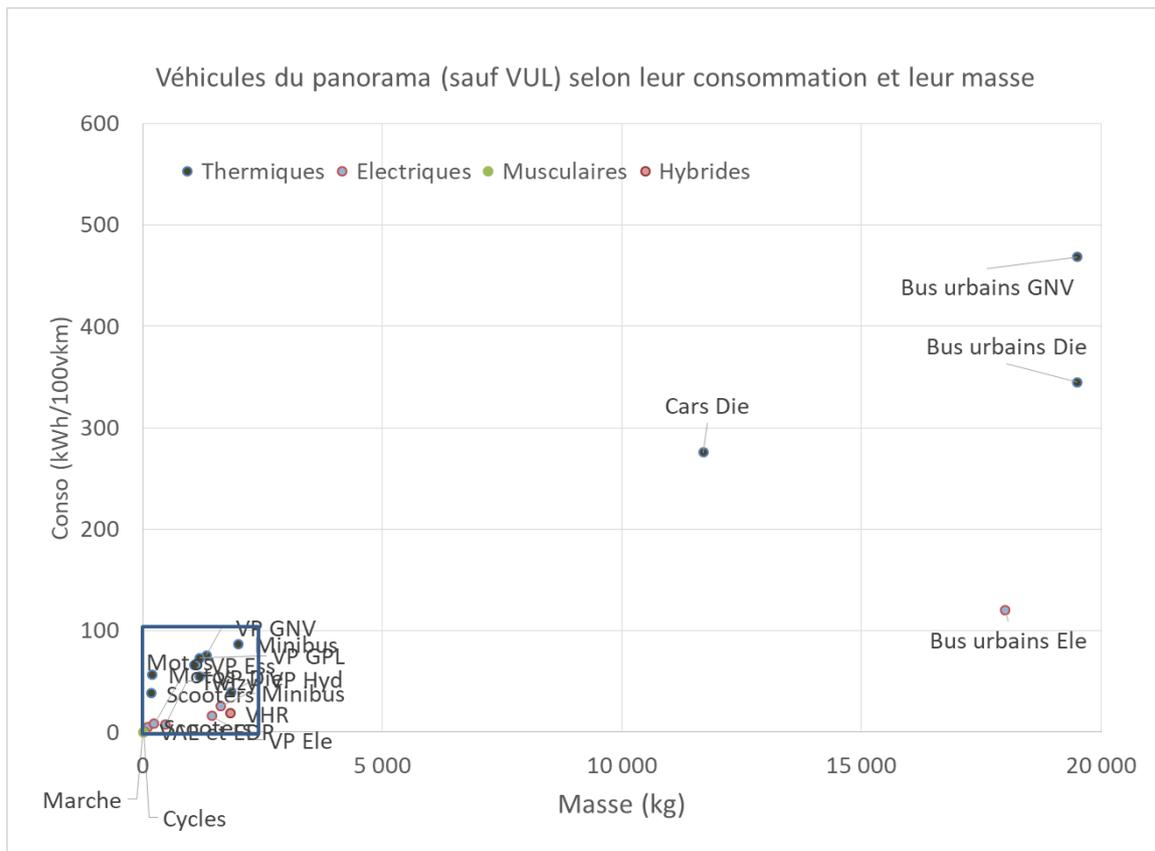


Figure 7 : Véhicules de l'étude (sauf VUL) de masse inférieure à 20 t, selon leur masse et leur consommation unitaire (en kWh/v.km). Die = diesel ; Ele = électrique. Le cadre bleu fait l'objet d'un zoom, représenté dans la figure suivante (Figure 8).

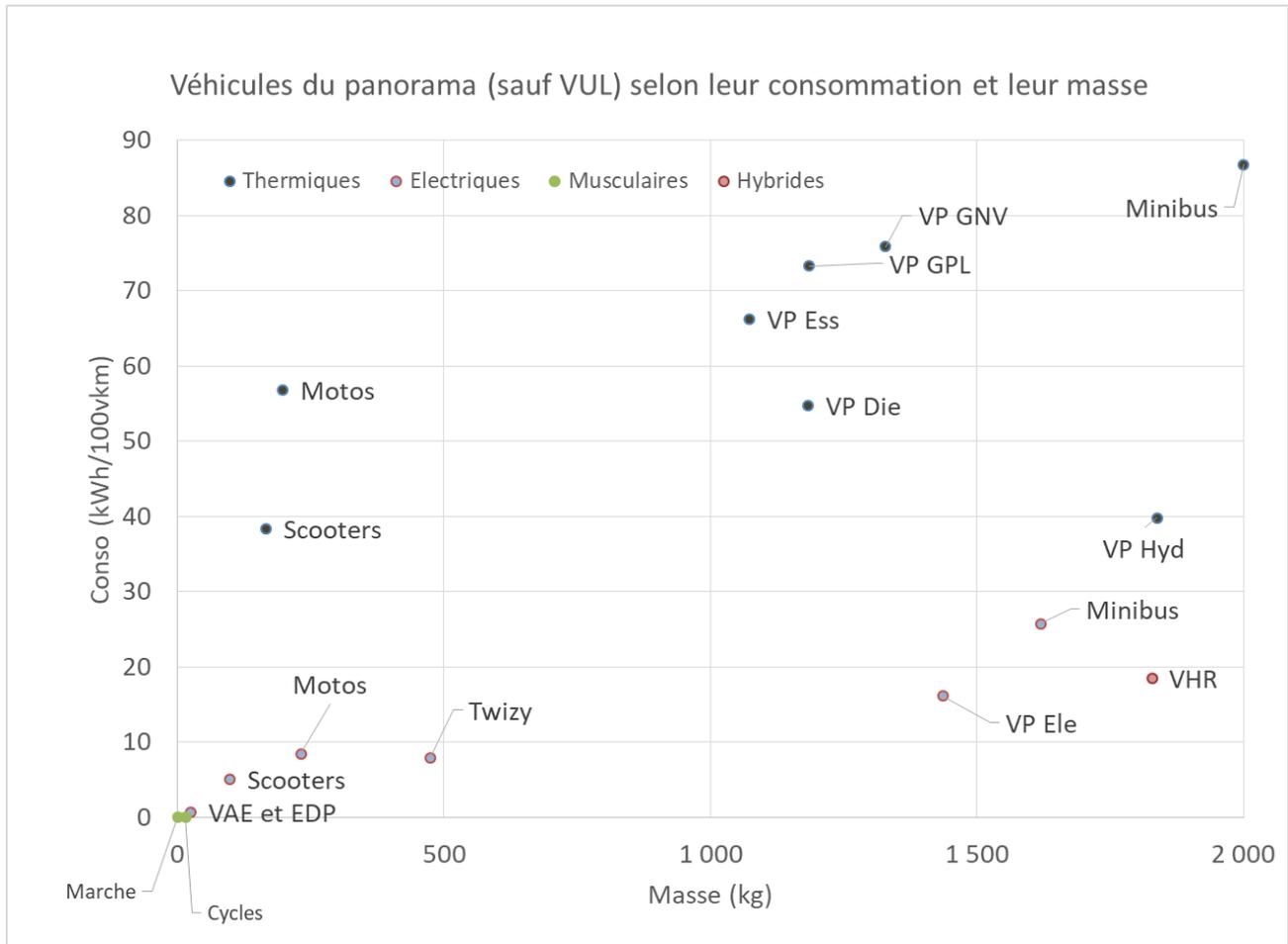


Figure 8 : Véhicules de l'étude (sauf VUL) de masse inférieure à 2 t, selon leur masse et leur consommation unitaire (en kWh/v.km). Die = diesel ; Ele = électrique ; Hyd = hydrogène ; Ess = essence.

Sans surprise, les véhicules les plus massifs sont ceux qui consomment le plus.

D'autre part, les véhicules électriques consomment moins que les véhicules thermiques à masse équivalente, étant donnée la plus grande efficacité de la chaîne « batterie + moteur électrique » (environ 80 % d'efficacité pour la batterie [105], et 95 % d'efficacité pour le moteur, soit environ 80 % d'efficacité énergétique) que pour le thermique (entre 36 % pour un bloc essence et 42 % pour un bloc diesel) [106]. Cette plus grande efficacité est essentiellement due à la plus grande qualité énergétique du vecteur électrique par rapport à celle des vecteurs thermiques³⁴.

Comme représenté sur les Figure 6, Figure 7 et Figure 8, qui excluent les véhicules utilitaires légers afin de ne garder que les modes de transport de personnes, les véhicules « très lourds » (supérieurs à 40 t) sont 2 à 10 fois plus lourds que les « véhicules lourds » (les bus, entre 10 et 20 t), qui sont eux-mêmes 5 à 10 fois plus lourds que les « véhicules légers » (les voitures, entre 1 et 2 t), eux-mêmes 2 à 4 fois plus lourds que les « véhicules très légers ».

On voit donc apparaître des grandes familles de véhicules, et également de grands espaces vides entre ces différentes familles, qui posent la question des véhicules qui pourraient être imaginés entre ces familles, si un besoin correspondant était identifié.

On peut imaginer que l'espace entre les véhicules très lourds et les bus n'a pas vocation à être exploité, les véhicules plus lourds que les bus étant en fait soit des bus plus longs, soit des véhicules nécessitant une infrastructure dédiée

³⁴On dit aussi que l'entropie de l'électricité est plus faible que celle de l'énergie thermique dégagée par la combustion de carburants fossiles ; autrement dit l'énergie électrique peut être transformée en grande partie en travail mécanique, alors qu'on ne peut transformer que 45% au mieux de l'énergie thermique issue de cette combustion en travail mécanique.

et donc devant avoir une capacité suffisamment grande pour rentabiliser l'infrastructure lourde en question. Difficile par exemple d'imaginer des « mini-tramways » rentables.

L'espace entre les bus et les minibus est en fait rempli, la gamme de ces véhicules étant très continue (on trouve des autocars d'une vingtaine de places et plus, et des minibus allant jusqu'à une vingtaine de places).

Enfin, l'espace entre les véhicules très légers et les voitures fait l'objet de l'**Encadré 7**.

Encadré 7 : Quel espace de conception entre les véhicules très légers et les voitures ? S'y trouve-t-il des véhicules particulièrement économes en énergie ?

La flexibilité d'usage de la voiture est telle qu'elle est utilisée pour satisfaire la majeure partie des besoins de mobilité, y compris ceux pour lesquels elle est « surdimensionnée » (trajets courts, transportant deux personnes au plus et peu de marchandises). Ainsi, la question de véhicules moins énergivores répondant aux justes besoins de mobilité émerge dans un contexte de prise en compte de contraintes énergétiques [31] : véhicules plus petits, transportant moins de personnes, moins puissants, ou moins rapides.

Or, force est de constater qu'entre les véhicules très légers et la voiture, l'espace de conception des véhicules paraît dépeuplé.

On pourrait imaginer, dans cet espace de conception, des voitures légères et peu puissantes, avec des portées réduites, pour un usage du quotidien. Ou encore, des cycles légers avec une motorisation électrique de l'ordre du kiloWatt (les speed-pedelecs, encore peu répandus en France). Ces véhicules auraient-ils une pertinence pour certains usages ? Restent-ils à inventer / développer, ou ont-ils déjà été expérimentés sans succès ?

L'exploration de cet espace de conception (voir Figure 9) peut se faire selon deux approches : « from the cycle up » (en « augmentant » le vélo), ou « from the car down » (en « diminuant » la voiture).

Lorsqu'on tente, conceptuellement, d'augmenter le vélo (en puissance, portée, vitesse...) on note un saut qualitatif entre l'énergie musculaire, peu puissante, et les vecteurs électricité ou carburants fossiles, développant facilement une puissance élevée.

Faire accélérer un véhicule lourd jusqu'à une vitesse donnée requiert un certain temps, qui dépend de la puissance développée par le moteur (ou le métabolisme du cycliste). Ainsi, avec l'énergie musculaire seule, le temps d'accélération pour atteindre la vitesse de croisière devient trop important pour des véhicules au-delà de 200 kg, ou pour des vitesses à atteindre au-delà de 35 km/h.

Par exemple, pour une personne développant 100 W au maximum en pédalant, la durée d'accélération nécessaire pour vaincre l'inertie de la masse d'un véhicule de 30 kg et de la personne elle-même (70 kg) pour atteindre 25 km/h, est d'environ 25 s. Pour un véhicule de 100 kg, il faut accélérer pendant 40 s avant d'atteindre 25 km/h. Et pour un véhicule de 200 kg, il faut plus d'une minute d'accélération.

De même, la vitesse maximale qu'on désire atteindre joue beaucoup³⁵ : dans l'exemple précédent, il faudrait plus de 45 s d'accélération pour atteindre 35 km/h avec le véhicule de 30 kg, sans même tenir compte des frottements de l'air et de frottements de roulement.

Ainsi, au-delà de 200 kg³⁶ et/ou 35 km/h, la force musculaire est le plus souvent complétée par un moteur (soit thermique, soit électrique) et un vecteur énergétique l'alimentant. Mais la différence de puissance entre la force musculaire et le moteur rend alors la première marginale dans l'apport de puissance total ! Par exemple, fournir 500 W avec de l'électricité ou un carburant liquide est très facile, réduisant l'apport musculaire (100 W) à seulement 1/6^{ème} de la puissance. Ce complément énergétique se fait en contrepartie de masse supplémentaire pour intégrer un moteur, le stockage du vecteur énergétique et pour les équipements de sécurité qui deviennent de plus en plus importants à mesure que la vitesse maximale augmente.

³⁵ L'énergie dépensée est proportionnelle au carré de la vitesse [107] : pour aller deux fois plus vite, il faut dépenser quatre fois plus d'énergie pour accélérer.

³⁶ Poids maximal d'un vélo-cargo chargé.

Ainsi l'espace de conception se scinde en deux parties lorsqu'on augmente les cycles : une partie à énergie musculaire dominante, réservée aux usages courte distance, à faible transport de charge (en marchandises ou personnes) et à vitesse peu importante, et une partie à énergie « autre », pour les usages plus longue distance, à vitesse plus importante et/ou avec transport de personnes/marchandises. Le speed-pedelec, le scooter, la Twizy, ou des véhicules à l'état de prototypes (Citroën Ami One, EV4...) illustrent le début de cette seconde partie, avec des masses de 150 kg (pour une personne) à 450 kg (pour deux personnes), et des vitesses de pointe de 45 à 80 km/h. Dans l'intervalle entre ces deux parties se trouvent les VAE, les EDP ou les vélos-cargo à assistance électrique.

La séparation entre les deux parties correspond assez nettement à celle qu'on trouve dans la catégorisation européenne des véhicules³⁷, entre les véhicules L1e-A (les cycles dits « à assistance électrique ») et les véhicules L1e-B (qui peuvent être plus puissants et rapides, et qui peuvent fonctionner sans apport d'énergie musculaire). Les acteurs pouvant produire ces véhicules sont différents, car l'homologation d'un modèle L1e-B est plus lourde financièrement que celle d'un modèle L1e-A, la rendant accessible à des acteurs plus financés.

Lorsque, à l'inverse, on tente de diminuer la voiture (en puissance, portée, vitesse), on fait en fait... un retour dans le temps. Ainsi, la Citroën AX (début des années 1990) pesait 700 kg, avait une puissance de 50 ch (37 kW) pour une portée de 700 km. Selon une étude italienne, le poids moyen d'une voiture a grimpé de 57 % en 50 ans, la vitesse de pointe moyenne passant de 132 km/h à 174 km/h [108]. Selon une étude de l'OCDE, les modèles de voitures vendus dans les pays de l'UE sont passés de 1000 kg en moyenne en 1975 à 1 400 kg en 2002, poids qui s'est stabilisé depuis [109]. Selon cette même étude, revenir aux poids moyens de 1975 permettrait de réduire les émissions unitaires des voitures de 28 % par rapport à un scénario de continuité, d'ici 2050.

Comment peut-on expliquer cette tendance à l'augmentation au cours du temps ? On peut avancer une explication reposant sur trois causes racines :

- L'augmentation des standards de sécurité
- L'augmentation des standards de pollution de l'air
- L'augmentation des standards d'émission de CO₂

Ces standards ont poussé les constructeurs à engager des coûts de développement, de conception et de fabrication pour y répondre (conception et fabrication d'éléments de sécurité³⁸, d'équipements de dépollution, de moteurs plus efficaces et commandés plus finement...), mais sans que ces coûts engagés soient directement compensés par des arguments de vente justifiant une augmentation des prix. Ainsi, pour couvrir ces coûts supplémentaires, la stratégie a été de proposer des éléments justifiant une valeur supplémentaire, et permettant de maintenir (au mieux) les marges constructeurs : une offre de puissance supplémentaire, et une offre d'équipements supplémentaires. Ajoutés aux éléments de sécurité qui, eux aussi, augmentent la masse, ces effets expliquent la tendance historique à « l'augmentation » de la voiture.

On voit donc que l'espace de conception côté voiture est orienté (à la hausse, c'est-à-dire vers plus de puissance et de masse) par les normes en vigueur et par les marges minimums des constructeurs. Il apparaît donc improbable, sans accompagnement dédié par la puissance publique (ou sans régression sur la sécurité est les standards de pollutions), que les marchés automobiles inversent la tendance à cette augmentation. Mais concrètement des véhicules de l'espace de diminution de la voiture ont existé, matérialisé par de petites voitures 4 places peu puissantes.

Pour comprendre la jonction des deux approches (cycle up, car down), on peut noter qu'une augmentation du nombre de places est nécessairement associée à une augmentation de la masse du véhicule, ce qui rend l'ajout de puissance et de portée (par un moteur plus puissant et un réservoir plus grand) moins influent sur la masse totale du véhicule. Il est alors tentant, pour les concepteurs, de les augmenter, ce qui mène vite à l'espace de conception « orienté à la hausse » sur lequel la voiture classique se trouve. Le choix (de conception) du nombre de places influe grandement sur la masse et détermine le positionnement dans l'espace de conception.

On peut alors simplifier la situation de l'espace de conception en le scindant selon le nombre de personnes à transporter : les véhicules pour une ou deux personnes sont proches du domaine des cycles, puis dès lors qu'on

³⁷ Article 4 du règlement (UE) 168/2013, retranscrit dans le Code de la Route (Article 311-1).

³⁸ Par exemple, une portière doit servir de déflecteur de choc latéral vers la structure de la voiture. Il a donc fallu équiper l'intérieur de la portière avec une structure d'acier permettant de répartir les efforts du choc vers la structure de la voiture.

passé à 4 personnes, on atteint directement le domaine de la voiture classique, naturellement orienté à la hausse comme nous l'avons vu.

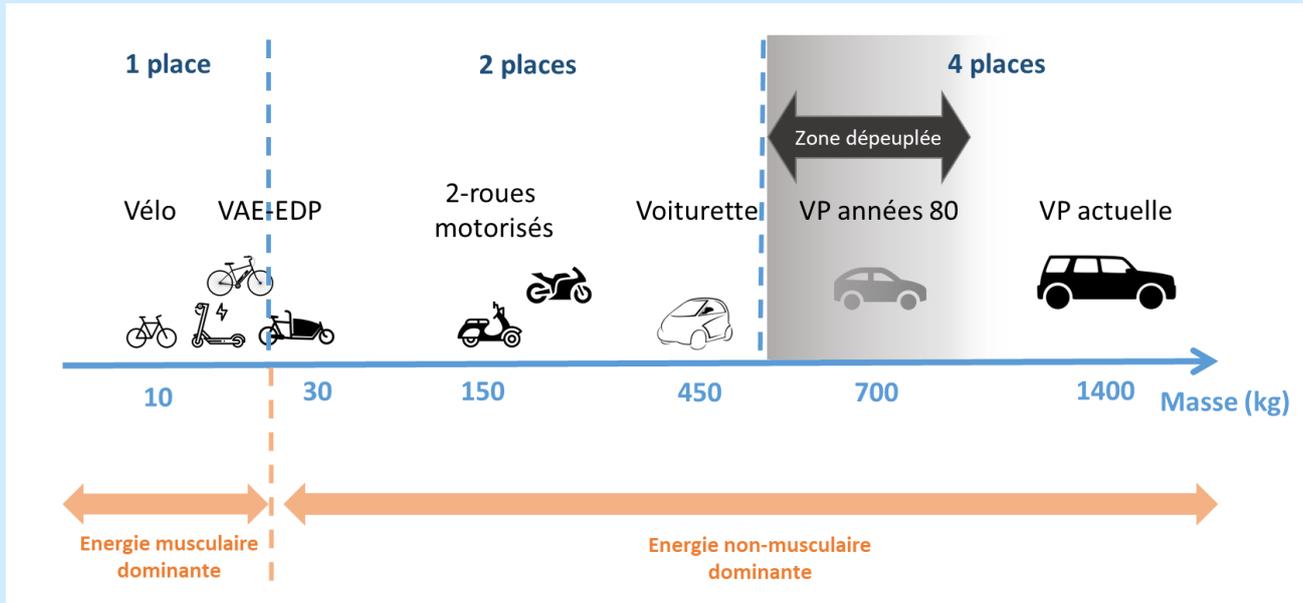


Figure 9 : Espace de conception du vélo jusqu'à la voiture actuelle, avec ses différents sous-espaces en fonction du nombre de places et de l'énergie utilisée

En conclusion, il semble que l'espace de conception entre les cycles et la voiture ait en fait déjà largement été exploré, et que les marchés actuels ne permettent pas d'aller vers (en fait, de revenir à) des conceptions de petites voitures peu puissantes. Des mesures orientant ces marchés sont nécessaires si jamais de tels véhicules doivent voir le jour dans le cadre de la transition énergétique.

2. La consommation par passager.kilomètre (si le véhicule est plein)

La masse sert en priorité à transporter des personnes : plus un véhicule doit transporter de personnes, plus il doit être spacieux, donc massif, et *in fine* plus puissant pour se déplacer. Il doit donc contenir un moteur plus puissant donc plus massif, et il doit contenir son vecteur énergétique en quantité suffisante pour fournir la puissance sur une distance suffisamment grande, ce qui rajoute de la masse (de carburant, ou de batterie).

En supposant que le service apporté par un véhicule est de transporter un certain nombre de personnes, il est intéressant de réaliser la comparaison des véhicules selon leur consommation par personne si le véhicule est plein, et selon leur masse. On compare alors l'efficacité énergétique des véhicules pour transporter des personnes, en fonction de leur masse.

On constate (Figure 10) une tendance assez claire pour les véhicules thermiques, à être d'autant plus efficaces qu'ils sont lourds, si jamais ils sont pleins. Autrement dit, la masse supplémentaire pour transporter des passagers supplémentaires, permet de baisser la consommation par personne. La motorisation, le carburant, y sont communalisés, permettant des « effets d'échelle ». Ce sont donc ainsi motos et scooters qui sont les moins efficaces.

Cette tendance existe aussi pour les véhicules électriques (le bus est plus efficace), mais de manière moins marquée, ce qui pourrait s'expliquer par le fait que la batterie représente un part plus grande de la masse totale du véhicule.

Enfin, on constate l'efficacité supérieure des véhicules électriques sur les véhicules thermiques, permise par la plus grande qualité énergétique du vecteur électrique que des vecteurs thermiques.

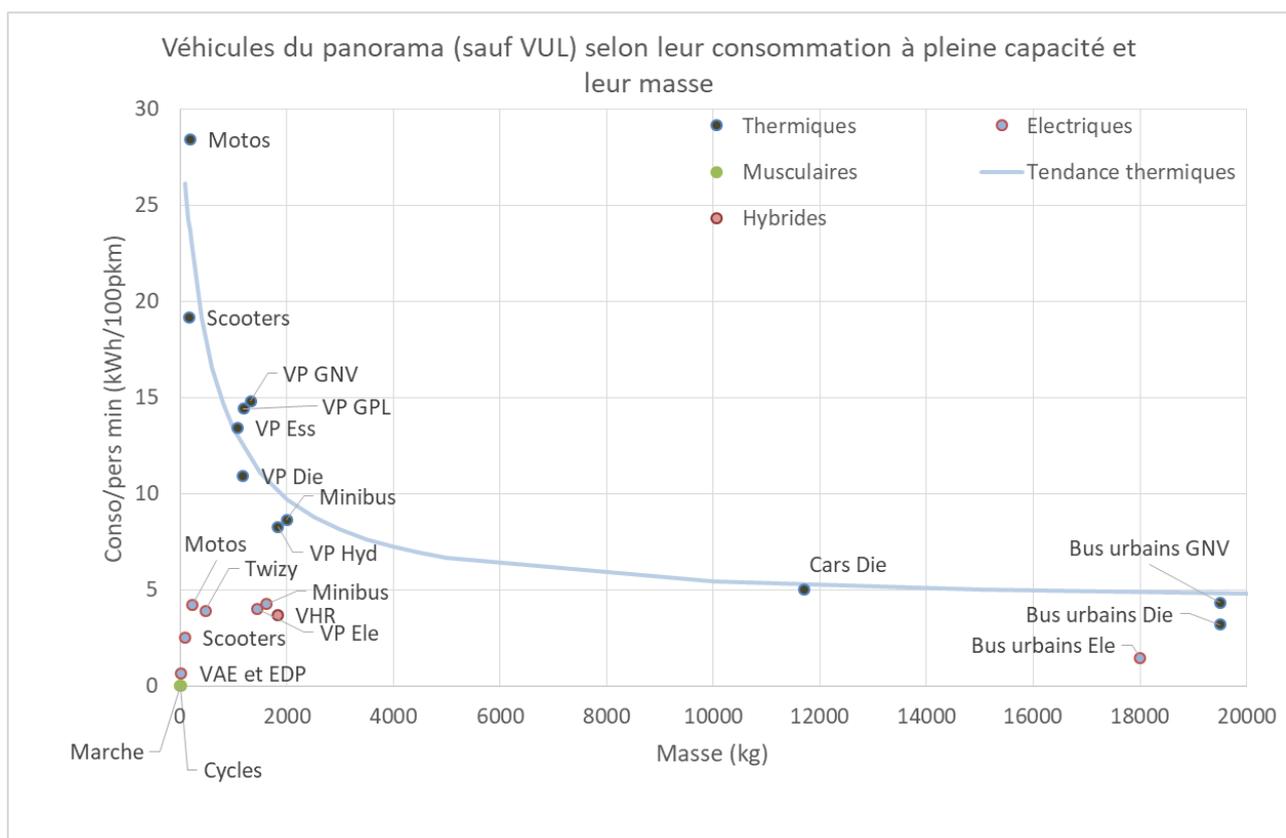


Figure 10 : Comparaison des véhicules de l'étude (sauf VUL, et limités à 20 tonnes) selon leur masse et leur consommation énergétique par personne, si le véhicule est plein.

Bibliographie

- [1] L. Foglia, « Guide pour une mobilité quotidienne bas carbone », The Shift Project, févr. 2020.
- [2] « La mobilité des Français - Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008 », CGDD, La Revue du CGDD, déc. 2010.
- [3] « Données sur le parc des véhicules au 1er janvier 2019 ». Ministère de la transition écologique et solidaire, 2019.
- [4] « Décarboner la mobilité dans les zones de moyenne densité - Moins de carbone, plus de lien », The Shift Project, 2017.
- [5] L. Dupin, « Pourquoi l'essor du diesel en France est lié à l'émergence du nucléaire », *L'usine nouvelle*, 08-oct-2015. .
- [6] « Près de 2 millions de véhicules GNV en France d'ici 2035 », *expo biogaz*, 05-avr-2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.expo-biogaz.com/fr/actualites/pres-de-2-millions-de-vehicules-gnv-en-france-d-ici-2035>. [Consulté le: 04-janv-2019].
- [7] F. Eyraud, « Voitures hybrides: les immatriculations en France par département en 2017 », *Automobile Propre*, 11-août-2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.automobile-propre.com/voitures-hybrides-immatriculations-france-departement-2017/>. [Consulté le: 26-déc-2019].
- [8] M. Torregrossa, « Ventes & immatriculations d'hybrides rechargeables en France », *Automobile Propre*, 06-déc-2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.automobile-propre.com/dossiers/ventes-immatriculations-vehicules-hybrides-rechargeables-france/>. [Consulté le: 26-déc-2019].
- [9] E. Bergerolle, « Comprendre le fonctionnement d'une voiture hybride », *Challenges*, 13-avr-2020. [En ligne]. Disponible sur: https://www.challenges.fr/automobile/dossiers/comprendre-le-fonctionnement-d-une-voiture-hybride_19637. [Consulté le: 06-janv-2020].
- [10] C. Le Roy et R. Potocki, « "Ensemble vers la mobilité électrique" 2019 - 2025 - 2030 », Wavestone / équilibre des énergies, 2019.
- [11] « Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie est le climat (version provisoire) », DGEC, 2019.
- [12] V. Lamblin, « La marche forcée du véhicule électrique », *futuribles International*, 223, mars 2019.
- [13] N. Meilhan, « Comment faire enfin baisser les émissions de CO2 des voitures », *France Stratégie*, 78, juin 2019.
- [14] « New market. New entrants. New challenges. Battery Electric Vehicles », Deloitte, 2019.
- [15] S. Amant, H.-M. Aulanier, C. Ramos, A. Schuller, et S. Timsit, « La France amorce le virage vers le véhicules électrique », *Carbone 4*, sept. 2016.
- [16] A. Piot, « Voitures électriques: la Porsche Taycan aura une boîte de vitesses », *LES NUMERIQUES*, 12-juin-2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.lesnumeriques.com/voiture/voitures-electriques-porsche-taycan-aura-boite-vitesses-n87873.html>. [Consulté le: 30-janv-2020].
- [17] A. Doche, « Une boîte de vitesses pour voiture électrique pour gagner de l'autonomie », *Caradisiac.com*, 27-août-2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.caradisiac.com/une-boite-de-vitesses-pour-voiture-electrique-pour-gagner-de-l-autonomie-178204.htm>. [Consulté le: 30-janv-2020].
- [18] C. Alix, « L'Europe dit oui à «l'Airbus des batteries» », *Libération*, 09-déc-2019. [En ligne]. Disponible sur: https://www.liberation.fr/futurs/2019/12/09/l-europe-dit-oui-a-l-airbus-des-batteries_1768205. [Consulté le: 30-janv-2020].
- [19] E. Fontaine, « Tesla Gigafactory 4: un investissement de 4 milliards d'euros et un financement public à la clef », *LES NUMERIQUES*, 20-nov-2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.lesnumeriques.com/voiture/tesla-gigafactory-4-un-investissement-de-4-milliards-d-euros-et-un-financement-public-a-la-clef-n143451.html>. [Consulté le: 30-janv-2020].

- [20] S. Qadiri, « Le véhicule électrique représente-t-il réellement l'avenir de l'automobile? », *L'Atelier BNP PARIBAS*, 08-mars-2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://atelier.bnpparibas/smart-city/article/vehicule-electrique-represente-t-il-reellement-avenir-automobile>. [Consulté le: 06-janv-2020].
- [21] « Les scénarios technologiques permettant d'atteindre l'objectif d'un arrêt de la commercialisation des véhicules thermiques en 2040 », OPECST, mars 2019.
- [22] « Contribution des véhicules légers et lourds à la réduction de la demande énergétique et des émissions de CO2 à l'horizon 2030 dans le monde », PFA Filière automobile & mobilités, oct. 2017.
- [23] P. Papon, « La voiture électrique : un défi technologique et industriel », *Energie Choix Futur*, 06-juin-2019. [En ligne]. Disponible sur: <http://pierrepapon.fr/?p=1028>. [Consulté le: 06-janv-2020].
- [24] « Paquet solidarité climatique - Quatre mesures écologiques et solidaires », MTES, janv. 2018.
- [25] J. Botella, « Transition-one transforme votre voiture en véhicule électrique », *Capital*, 25-oct-2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.capital.fr/lifestyle/transition-one-transforme-votre-voiture-en-vehicule-electrique-1353748>. [Consulté le: 09-janv-2020].
- [26] J.-P. Peden, « Voiture électrique : les 6.000 euros de bonus, c'est fini ! », *Auto Plus*, 18-déc-2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.autoplus.fr/actualite/Bonus-Bonus-ecologique-Voiture-electrique-Montant-Malus-2020-1545104.html>. [Consulté le: 30-janv-2020].
- [27] E. Bergerolle, « Pourquoi une telle avalanche de voitures électriques en 2020 », *Challenges*, 06-janv-2020. [En ligne]. Disponible sur: https://www.challenges.fr/automobile/actu-auto/pourquoi-telle-avalanche-de-voitures-electriques-en-2020_692293. [Consulté le: 30-janv-2020].
- [28] « Enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique », RTE, mai 2019.
- [29] M. Chéron, A. Gilbert-d'Halluin, et A. Schuller, « Quelle contribution du véhicule électrique à la transition écologique en France ? », FNH, déc. 2017.
- [30] « Leading scientists set out resource challenge of meeting net zero emissions in the UK by 2050 », *Natural History Museum*, 05-juin-2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.nhm.ac.uk/press-office/press-releases/leading-scientists-set-out-resource-challenge-of-meeting-net-zero.html>.
- [31] « Peut-on faire mieux que le tout-voiture électrique en France », The Shift Project, 2018.
- [32] « Moteur Diesel », *Wikipédia*, 08-déc-2019. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_Diesel. [Consulté le: 27-déc-2019].
- [33] « Quelles sont les différences entre moteur diesel et essence », *Fiches-auto.fr*, 13-oct-2019. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-d-une-auto/s-1362-differences-entre-moteur-diesel-et-essence.php>. [Consulté le: 27-déc-2019].
- [34] « Rouler au bioGNV - Guide pratique pour les transporteurs routiers », ATEE - Club biogaz, 2015.
- [35] S. Compagnon, « 409 bus au gaz naturel vont circuler en Ile-de-France à partir de 2020 », *Le Parisien*, 01-oct-2019. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.leparisien.fr/info-paris-ile-de-france-oise/transports/409-bus-au-gaz-naturel-vont-circuler-en-ile-de-france-a-partir-de-2020-01-10-2019-8163816.php>. [Consulté le: 27-déc-2019].
- [36] M. Bermani, « Motos et scooters électriques : bilan du marché 2018 », *Motoservices.com*, 18-janv-2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.motoservices.com/actualite-vehicule-electrique/Motos-et-scooters-electriques-bilan-du-marche-2018-janv-2019.htm>. [Consulté le: 27-déc-2019].
- [37] D. Bénita et D. Fayolle, « Panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains », ADEME / AJBD, 2018.
- [38] « Quelles filières énergétiques pour les autocars ? », ADEME / FNTV / Régions de France, sept. 2017.
- [39] « Transport par câble aérien en milieu urbain », Certu, 125, juin 2012.
- [40] « Les transports express régionaux à l'heure de l'ouverture à la concurrence », Cour des comptes / Chambres régionales & territoriales des comptes, oct. 2019.
- [41] L. Peillon, « A-t-on des données chiffrées sur l'explosion du marché des Wheels et des trottinettes électriques? », *CheckNews.fr*, 19-sept-2018. [En ligne]. Disponible sur: https://www.liberation.fr/checknews/2018/09/19/a-t-on-des-donnees-chiffrees-sur-l-explosion-du-marche-des-wheels-et-des-trottinettes-electriques_1679565. [Consulté le: 30-déc-2019].

- [42] « Les chiffres du marché du cycle 2018 : le VAE continue son envol », *cyclable*, 15-avr-2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.cyclable.com/blog/2019/04/15/les-chiffres-du-marche-du-cycle-2018-le-vae-continue-son-envol/>. [Consulté le: 30-déc-2019].
- [43] A. Lelievre, « Vélo : l'échappée belle du marché électrique en France », *Les Echos ENTREPRENEURS*, 21-nov-2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://business.lesechos.fr/entrepreneurs/idees-de-business/0602257185564-velo-l-echappee-belle-du-marche-electrique-en-france-333155.php>. [Consulté le: 27-janv-2020].
- [44] « Mobilité. Forte croissance du marché de la trottinette électrique en 2018 », *ouest france*, 01-avr-2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ouest-france.fr/economie/transports/mobilite-forte-croissance-du-marche-de-la-trottinette-electrique-en-2018-6289574>. [Consulté le: 30-déc-2019].
- [45] V. Montgaillard, « Les accidents de trottinettes en forte hausse », *Le Parisien*, 11-oct-2018. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.leparisien.fr/societe/les-accidents-de-trottinettes-en-forte-hausse-10-10-2018-7916037.php>. [Consulté le: 30-déc-2019].
- [46] « Les trottinettes électriques entrent dans le code de la route », *Ministère de l'intérieur*, 04-mai-2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.interieur.gouv.fr/Espace-presse/Dossiers-de-presse/Les-trottinettes-electriques-entrent-dans-le-code-de-la-route>.
- [47] D. Meyer, « Bilan marché 50 2018 : la dégringolade ! », *Motoservices.com*, 22-janv-2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.motoservices.com/actualite-50/Bilan-marche-50-2018-la-degringolade-janv-2019.htm>. [Consulté le: 30-déc-2019].
- [48] « Le point sur : la circulation inter-files », *Passion Moto Sécurité*. [En ligne]. Disponible sur: <https://moto-securite.fr/interfiles/>. [Consulté le: 30-déc-2019].
- [49] « Fiche Renault Twizy 80 », *Motoservices.com*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.motoservices.com/guide-vehicule-electrique/electrique/Renault/Twizy-80.htm>. [Consulté le: 30-déc-2019].
- [50] « Twizy, le grand oublié des véhicules électriques chez Renault », *Automobile Propre*, 09-juin-2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.automobile-propre.com/twizy-le-grand-oublie-des-vehicules-electriques-chez-renault/>. [Consulté le: 30-déc-2019].
- [51] R. Heinberg et D. Fridley, *Un futur renouvelable - Tracer les contours de la transition énergétique*, Les Editions Ecosociété. 2019.
- [52] « Combien y a-t-il de stations-service en France ? », *Connaissance des Énergies*, 10-août-2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.connaissancedesenergies.org/le-nombre-de-stations-service-baisse-t-il-en-france-140203>. [Consulté le: 26-déc-2019].
- [53] A. Thuot, « Le GPL reste l'énergie alternative la plus utilisée au monde », *Auto Infos*, 08-févr-2016. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.auto-infos.fr/Le-GPL-reste-l-energie-la-plus,7750>. [Consulté le: 26-déc-2019].
- [54] « PCI des combustibles », *Bilans GES - ADEME*, oct-2014. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.bilans-ges.ademe.fr/fr/basecarbone/donnees-consulter/liste-element/categorie/33>. [Consulté le: 26-déc-2019].
- [55] « Pouvoir calorifique inférieur », *Wikipédia*, 23-juill-2019. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/wiki/Pouvoir_calorifique_inf%C3%A9rieur. [Consulté le: 26-déc-2019].
- [56] « Structuration des prix de l'essence et du gazole en France », *Connaissance des Énergies*, 17-juill-2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/structuration-des-prix-de-l-essence-et-du-gazole-france>. [Consulté le: 26-déc-2019].
- [57] « Le prix des carburants », *Le prix des carburants*, 26-déc-2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.prix-carburants.gouv.fr/>. [Consulté le: 26-déc-2019].
- [58] « Stations gaz naturel (GNV) en France : ou en sommes-nous ? », *Gaz-mobilite.fr*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.gaz-mobilite.fr/dossiers/station-gnv-gnc-gnl-etat-des-lieux-france/>. [Consulté le: 26-déc-2019].
- [59] « Gaz naturel véhicule - Comment porter un projet de station ouverte au public », FNCCR/GRD, 2016.
- [60] « Etude sur la compétitivité du gaz naturel utilisé en tant que carburant CNG (compressed natural gas) et LNG (liquefied natural gas) pour divers types de véhicules », CREG, 2019.
- [61] « Fiscalité des énergies », *Ministère de la transition écologique et solidaire*, 13-août-2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/fiscalite-des-energies>. [Consulté le: 26-déc-2019].

- [62] « Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique », Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2018.
- [63] « Production d'hydrogène à partir des procédés de reformage et d'oxydation partielle », AFHYPAC - IFPEN, Fiche 3.1.1, oct. 2011.
- [64] B. Le Floc'h, « Quid de l'hydrogène pour les véhicules utilitaires légers ? », *Caradisiac.com*, 29-nov-2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.caradisiac.com/quid-de-l-hydrogene-pour-les-vehicules-utilitaires-legers-172704.htm>. [Consulté le: 26-déc-2019].
- [65] « Le transport d'hydrogène », AFHYPAC, mai 2016.
- [66] « La distribution de l'hydrogène pour les véhicules automobiles », AFHYPAC, févr. 2016.
- [67] « Les données de base physico-chimiques sur l'hydrogène », AFHYPAC, Fiche 1.2, mars 2013.
- [68] « Filière hydrogène-énergie », Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie/CGEDD - Ministère de l'économie, de l'industrie et du numérique/CGEIIET, sept. 2015.
- [69] E. Beeker, « Y a-t-il une place pour l'hydrogène dans la transition énergétique ? », France Stratégie, 2014.
- [70] « Mix réseau électrique », *Bilans GES - ADEME*, 2014. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.bilans-ges.ademe.fr/fr/basecarbone/donnees-consulter/choix-categorie/categorie/62>. [Consulté le: 26-déc-2019].
- [71] « Tarification de l'électricité », *Connaissance des Énergies*, 17-août-2017. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/tarification-de-l-electricite>. [Consulté le: 26-déc-2019].
- [72] X. Montagne, « Biocarburants : potentiels et perspectives », présenté à groupe Biomasse, IFPEN, mars-2013.
- [73] L. Chauveau, « Avec Futurol, la production d'éthanol de deuxième génération arrive à maturité », *Sciences et Avenir*, 14-févr-2019.
- [74] « Biocarburants », *Ministère de la transition écologique et solidaire*, 24-déc-2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/biocarburants>. [Consulté le: 27-déc-2019].
- [75] *Contenu énergétique des carburants et biocarburants destinés au transport - Annexe 1 de l'arrêté du 2 mai 2012 relatif aux contenus énergétiques des biocarburants et des carburants*. 2012.
- [76] D. Lorne et A. Bouter, « Tableau de bord biocarburants 2019 », *IFP Energies nouvelles*, 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/tableau-bord-biocarburants-2019>.
- [77] « Biocarburants - Nos solutions », *IFP Energies nouvelles*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/innovation-et-industrie/nos-expertises/energies-renouvelables/biocarburants/nos-solutions>. [Consulté le: 27-déc-2019].
- [78] A. Joly et C. Cassagnaud, « Biométhane et climage font-ils bon ménage ? », *Carbone 4*, 2019.
- [79] « Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau », AFHYPAC, 2017.
- [80] « Les 100 autos les plus vendues en France en 2018 », *Auto Plus*, 02-janv-2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.autoplus.fr/renault/clio/actualite/Renault-Clio-Top-100-Meilleures-ventes-2018-Voitures-1534405.html>. [Consulté le: 30-déc-2019].
- [81] R. Burgan, « Voitures hybrides et hybrides rechargeables 2019 : tous les modèles, leur prix, leur autonomie », *auto-moto.com*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.auto-moto.com/green/voitures-hybrides-rechargeables-modeles-marche-prix-autonomie-audi-bmw-lexus-mercedes-peugeot-porsche-toyota-volvo-76932.html#item=13>.
- [82] « Rechercher une fiche technique », *L'argus*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.largus.fr/fiche-technique.html>. [Consulté le: 30-déc-2019].
- [83] « Automobile Propre », *Automobile Propre*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.automobile-propre.com/>. [Consulté le: 30-déc-2019].
- [84] « Catalogue des véhicules GNC », GNV / GRDF, juill. 2019.
- [85] « Autocatalog », *Auto-Data.net*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.auto-data.net/en/allbrands>. [Consulté le: 30-déc-2019].

- [86] « Voitures GPL », *Gaz-mobilite.fr*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.gaz-mobilite.fr/voiture-gpl/>. [Consulté le: 30-déc-2019].
- [87] « List of fuel cell vehicles », *Wikipédia*, 12-oct-2019. [En ligne]. Disponible sur: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_fuel_cell_vehicles. [Consulté le: 30-déc-2019].
- [88] M. Bermani, « Bilan marché moto scooter 2018 : tous les chiffres ! », *Motoservices.com*, 15-janv-2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.motoservices.com/actualite-moto/Bilan-marche-moto-scooter-2018-tous-les-chiffres-janvier-2019.htm>. [Consulté le: 30-déc-2019].
- [89] « Vélos électriques », *Cyclurba*. [En ligne]. Disponible sur: https://cyclurba.fr/vae_velo_kit/1/Velos-electriques.html.
- [90] J. Calma, « Les meilleurs skates électriques que vous pouvez acheter », *Monskate Electrique*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.monskateelectrique.com/meilleursskateselectriques/>. [Consulté le: 30-déc-2019].
- [91] « Trottinettes électriques », *Darty*. [En ligne]. Disponible sur: https://www.darty.com/nav/achat/sports_loisirs/glisse_urbaine/trottinette_electrique/index.html. [Consulté le: 30-déc-2019].
- [92] « Décathlon », *Décathlon*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.decathlon.fr/>. [Consulté le: 30-déc-2019].
- [93] « Alternative Antriebe im ÖPNV Ingelheim », Stadtverwaltung Ingelheim am Rhein / Transferstelle Bingen (TSB).
- [94] « Die Citaro Stadtbusse. Technische Information. », Mercedes-Benz.
- [95] « Mind the gap », Transport & Environment, 2016.
- [96] « Quantifying the impact of real-world driving on total CO2 emissions from UK cars and vans », *elementenergy / icct*, sept. 2015.
- [97] P. Schwoerer, « L'autonomie de 20 voitures électriques testée en Norvège », *Automobile Propre*, 31-janv-2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.automobile-propre.com/lautonomie-de-20-voitures-electriques-testee-en-norvege/>. [Consulté le: 01-févr-2020].
- [98] A. Larigaudrie, « Hybrides rechargeables : la crainte de la fausse bonne idée », *BFM Business*, 14-nov-2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://bfmbusiness.bfmtv.com/monde/hybrides-rechargeables-la-crainte-de-la-fausse-bonne-idee-1565337.html>. [Consulté le: 06-janv-2020].
- [99] E. Bergerolle, « Hybrides : quels avantages pour quels usages? », *Challenges*, 13-avr-2016. [En ligne]. Disponible sur: https://www.challenges.fr/automobile/dossiers/hybrides-quels-avantages-pour-quels-usages_47789#entre_conso_officielle. [Consulté le: 06-janv-2020].
- [100] C. Walsh, P. Jakeman, R. Moles, et B. O'Regan, « A comparison of carbon dioxide emissions associated with motorised transport modes and cycling in Ireland », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 13, n° 6, p. 392-399, août 2008, doi: 10.1016/j.trd.2008.07.002.
- [101] A. Del Duce, « Life Cycle Assessment of conventional and electric bicycles », présenté à Eurobike 2011, Friedrichshafen, 02-sept-2011.
- [102] T. Buø, « Environmental Assessment of Bus Transport in the Trondheim Region », NTNU - Trondheim, juin 2015.
- [103] « UITP - Projet "SORT" - Cycles standardisés d'essais sur route », UITP, 2009.
- [104] « Bilan électrique 2018 », RTE, 2018.
- [105] « Lithium-ion battery », *Wikipédia*, 02-janv-2020. .
- [106] F. Spath, « Voiture électrique : combien d'énergie perdue pour faire le plein? », *breezcar*, 11-oct-2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.breezcar.com/actualites/article/deperdition-energie-recharge-batterie-voiture-electrique-1018>. [Consulté le: 31-déc-2019].
- [107] O. Del Bucci, « Petite physique à l'usage des automobilistes curieux et conscients », SUPAERO-DECARBO.
- [108] A. Chênerie, « Le poids moyen d'une voiture a grimpé de 57% en 50 ans », *motor1.com*. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.motor1.com/news/266197/poids-moyen-voiture-augmentation-etude/>. [Consulté le: 07-janv-2020].

[109] « Lightning-Up: How Less Heavy Vehicles Can Help Cut CO2 Emissions », OECD - International Transport Forum, 2017.

Auteur

Nicolas RAILLARD

Fonction – nicolas.raillard@theshiftproject.org

Nicolas Raillard a rejoint le *Shift* après avoir été ingénieur en stratégie système pendant 4 ans. Diplômé de l'ISAE-Supaéro et du Georgia Institute of Technology (USA), il a obtenu le mastère spécialisé « Environment International Management » des Mines ParisTech / Tsinghua University (Chine). Il met aujourd'hui en œuvre ses compétences en gestion des systèmes complexes dans la transition écologique, et notamment dans la mobilité périurbaine et les systèmes électriques.

The Shift Project

The Shift Project est un think tank qui œuvre en faveur d'une économie post-carbone. Association loi 1901 reconnue d'intérêt général et guidée par l'exigence de la rigueur scientifique, notre mission est d'éclairer et influencer le débat sur la transition énergétique en Europe. Nos membres sont de grandes entreprises qui veulent faire de la transition énergétique leur priorité.

Contact presse : Jean-Noël Geist, Chargé des affaires publiques et de la communication
+ 33 (0) 6 95 10 81 91 | jean-noel.geist@theshiftproject.org

THE SHIFT PROJECT



THE CARBON TRANSITION THINK TANK

www.theshiftproject.org