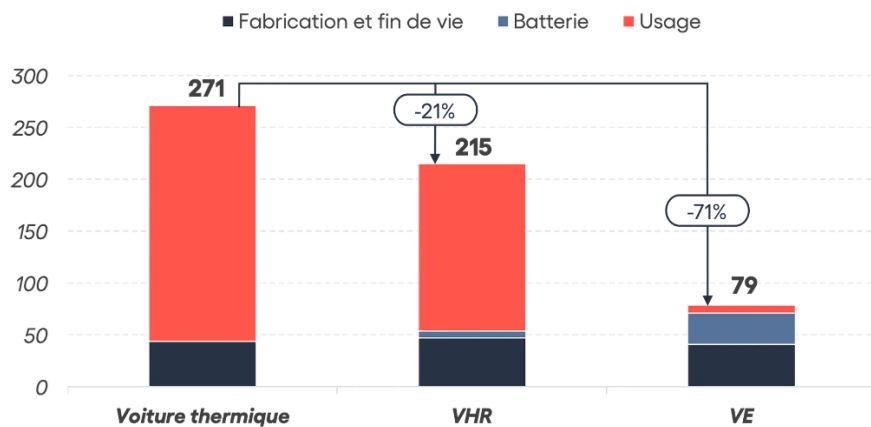


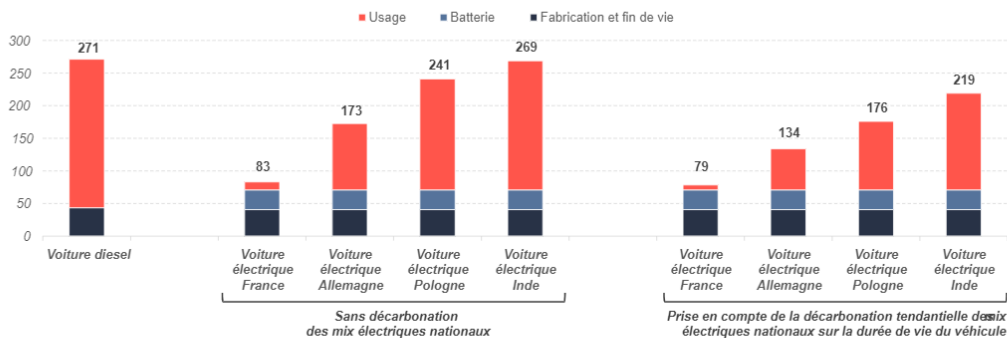
Facteur 10 - Dossier énergétique

1. Introduction - L'énergie comme fil rouge

Dans ce dossier nous allons évoquer le bilan énergétique et l'analyse du cycle de vie du véhicule facteur 10. Or lorsqu'il s'agit d'analyse de cycle de vie des véhicules, les comparaisons en gCO₂/km sur des kilométrages déterminés sont légion. Ils incluent de fait pour les véhicules électriques le mix énergétique du pays d'utilisation du véhicule. A l'échelle mondiale néanmoins 80% du mix énergétique primaire est composé d'énergies fossiles. Récemment les politiques de décarbonation de l'énergie (développement des énergies renouvelables, relance des programmes nucléaires en France, développement du Carbon Capture and Storage) font espérer que dans les années à venir ce pourcentage d'énergie primaire est amenée à diminuer.



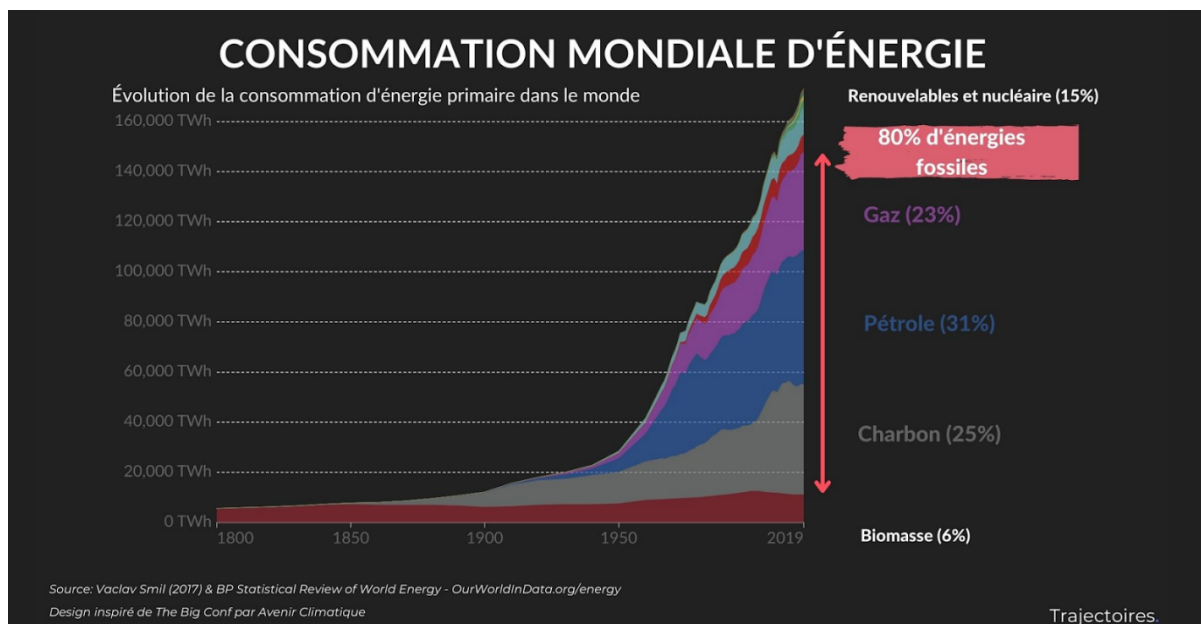
Empreinte carbone moyenne d'une voiture vendue en 2020 en France - Segment D - 200 000 km | gCO₂e/km



Empreinte carbone moyenne d'une voiture vendue en 2020 en fonction du pays et de la décarbonation des mix électriques - Segment D - 200 000 km | gCO₂e/km

Source : Carbone 4

A ce jour néanmoins la demande en énergie dans le monde reste haussière, et les sources d'énergie primaire marginales sont carbonées. Les analyses en gCO₂/km en France peuvent dès lors être sujettes à controverse.



Anticipons quelques conclusions :

Le projet Facteur 10 prend le parti de centrer son analyse sur l'énergie requise à l'usage qui représente en moyenne 80% de l'énergie consommée sur un cycle de vie pour un véhicule parcourant 200 000km. L'objectif de réduction d'un facteur 10 de la consommation d'énergie à l'usage doit permettre une réduction de 72% de l'énergie consommée sur un cycle de vie du véhicule Facteur 10 comparativement à une voiture.

L'énergie consommée sur le cycle de vie lié à la fabrication et à la fin de vie d'une voiture représente 20% de l'énergie totale sur un cycle de vie de 200 000km. Le véhicule Facteur 10 pèse 365 kg et sa conception est semblable à celle d'une voiture. Pesant 3 fois moins qu'une voiture électrique son bilan CO₂/Énergétique de production sera ~ 3 fois inférieur à celui d'une voiture soit une économie de 13% de l'énergie sur le cycle de vie comparativement à une voiture.

L'approche qualitative du véhicule Facteur 10 sur les matériaux et le design, ainsi qu'une conception soignée vise d'assurer un usage sur minimum 300 000km incluant un remplacement de batterie à 150 000km (considérant ¼ de remplacement de la masse de Facteur 10 sur 300 000km). L'objectif des 300 000km permettant de mettre des chiffres sur les bilans, l'intention du projet étant de revenir à l'achat d'un véhicule qui soit un investissement sur le très long terme (comme le parviennent les voitures de collection, 4x4 defender ou Mercedes classe G, 2CV à son époque). Un projet émancipateur pour le client qui aura plaisir à ce que son véhicule l'accompagne sur des décennies.

L'ambition de Facteur 10 se lit comme suit dans les chiffres :

	Voiture réf 200 000km	Facteur 10 200 000km	Facteur 10 300 000km
fabrication	20	7	9
Usage	80	8	4
ref 100%	100	15	13

Energie consommée sur une cycle de vie

Energie consommé sur un cycle de vie (projection)

	voiture essence	voiture Diesel	Véhicule électrique	Facteur 10
Production (GJ)	74	74	125	34
ACV 50 000km (GJ)	170	155	207.5	43
ACV 100 000km (GJ)	266	236	290	51
ACV 200 000km (GJ)	458	398	455	67
ACV 300 000km (GJ)	650	560	620	84

Estimations ACV Facteur 10 (base ACV bibliothèque ADEME)

L'estimation faite via les 2 méthodes (analyse ordre de grandeur) et analyse sur base des éléments de construction du véhicule et de la consommation projetée donnent le même résultat : Facteur 10 propose une consommation d'énergie qui serait 13% celle d'un véhicule (citadine compact) pour une durée de vie de 300 000km

2. Fabrication

A ce stade du projet, les informations que nous avons obtenues nous permettent de fixer les ordres de grandeurs et les compositions du véhicule avec une précision estimée à 10% (en ligne avec l'imprécision sur le poids du véhicule final). Les circuits d'approvisionnement n'étant pas encore finalisés, les calculs sont faits sur les bases des standards du marché.

% Poids (estimations)	Référence	Facteur 10
Métaux	70%	60%
Plastiques	10%	20%
Métaux non ferreux	4%	2%
Verre	3%	2%
Pneus	3%	7%
Textile	2%	5%
Autres	8%	4%

Source ADEME 2019

3. Consommation à l'usage - le cœur du projet Facteur 10

Une approche simple : toutes les consommations d'énergie du véhicule (rendement moteur / batterie / transmission etc....) sont proportionnelles à l'énergie nécessaire pour déplacer le véhicule.

Sur les premiers paramètres (transmission, rendement moteur, pertes thermiques, roulements), les efficacités des équipements disponibles sur le marché fixent une meilleure efficacité atteignable. Le gain d'énergie possible sur chaque élément est marginal et requiert des efforts de R&Ds importants.

Pour ce qui est du cœur de la consommation, elle répond à une équation simple et connue depuis bien longtemps. L'intégration dans le temps de la puissance sur l'arbre moteur que nous pouvons exprimer ainsi :

$$T_{wheel} = \left[m \frac{dV}{dt} + \frac{1}{2} \rho V^2 C_x S + mg \sin(\alpha) + mg f \cos(\alpha) \right] * R = \frac{P_{wheel}}{V} * R \quad \text{Eq 1}$$

With.ma=m+0.04CB

3 paramètres principaux apparaissent :

- m mass of the vehicle
- Cx: drag coefficient
- S: frontal area

La consommation d'énergie étant liée de manière proportionnelle à ces 3 grandeurs, Facteur10 vise l'optimisation simultanée de ces 3 paramètres qui ont, d'après l'analyse de sensibilité autour des valeurs visées par facteur 10, les poids respectifs suivant :

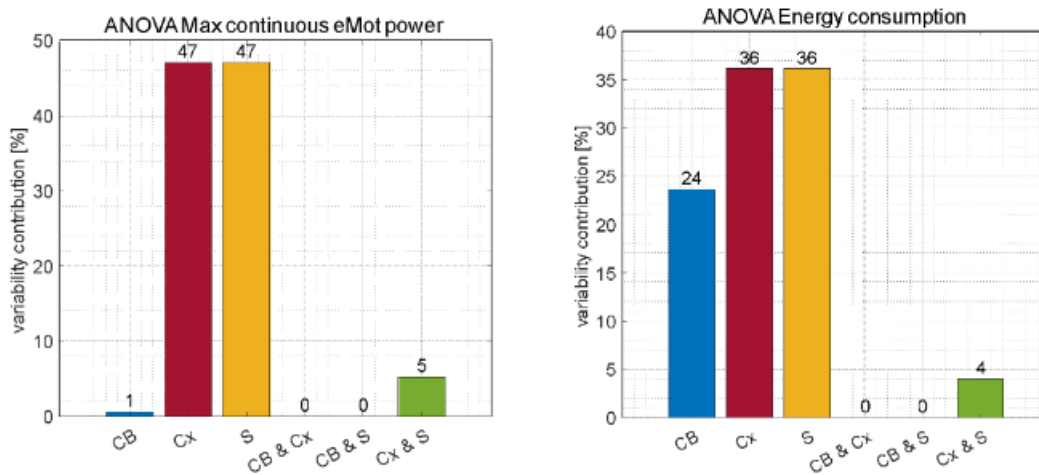


Figure 5. Relative importance in % of the sensible parameters and their eventual interaction

Point d'étude de sensibilité :

	min.	max.
Weight [kg]	400	800
Cx	0,15	0,30
S [m²]	1,5	3

Table 2

En exécutant les calculs de consommation par simulation de la chaîne de traction sélectionnée on obtient les résultats suivant (pour 2 packs batterie en parallèle soit 3.2kWh installé) :

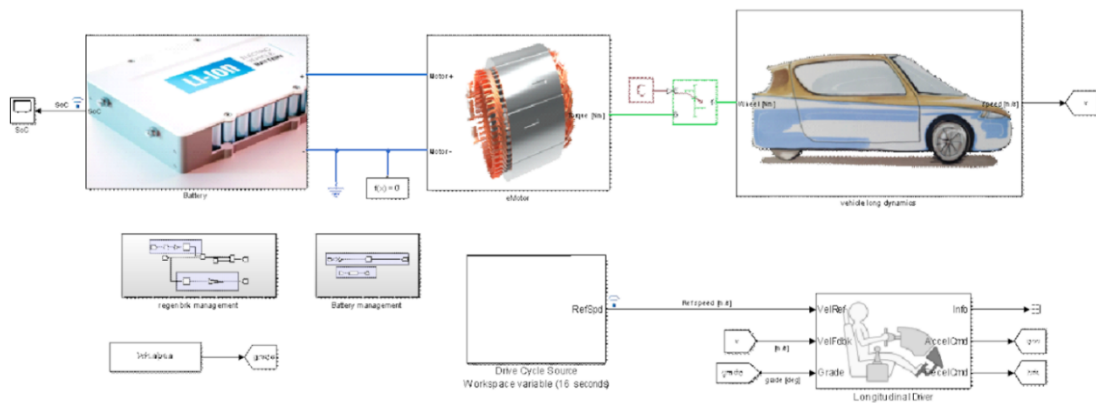


Figure 11. Forward model

Schéma de la chaîne de traction simulée forward model

	WLTC class 1	Extra-urban (V=110 km/h)
Consumption [kWh/100km]	1.42	2.60
Range [km]	228	125

Table 8. Estimated consumption and range

Ces résultats permettent de valider la possibilité d'une consommation réduite d'un facteur 10 moyennant l'atteinte des paramètres cibles (actuellement surface frontale estimée à 1.25m², poids 400kg et avant étude aérodynamique Cx estimé possible d'atteindre en configuration route : 0.13).

4. Le cas de l'autoroute

Le dimensionnement de la chaîne de traction et du pack batterie répond à de nombreux critères. Le plus exigeant d'entre eux s'avère être la marche sur trajet autoroutier : ce mode de fonctionnement, s'il est envisagé est dimensionnant pour le pack batterie, la puissance continue du moteur, le système de refroidissement.

Si l'on extrapole les résultats obtenus par simulation, une marche sur autoroute impose une consommation d'énergie à 130km/h de l'ordre de 4.5kwh/100km, et un pack batterie en conséquence soit 10kWh.

Il y a donc une discussion de fond sur l'accès à l'autoroute du véhicule. 50% des émissions de CO2 des déplacements en véhicule particulier étant réalisés sur les 1.5% de déplacements les plus longs, cela rend pertinent l'offre d'un véhicule sobre en énergie ayant accès à l'autoroute. C'est la direction que souhaite prendre Facteur 10.

Merci aux étudiants IFP School Dante Modesti, Louis Bernaert, Liwei He pour leur contribution à ces résultats.

5. Facteur 10

Le Facteur 10 de réduction énergétique est à la fois ambitieux et très enthousiasmant. Il dessine un autre rapport au transport centré sur l'efficacité. L'efficacité qui est elle-même une source sensorielle de plaisir à l'utilisation. Un résultat énergétique tangible, qui peut être mis à l'échelle et qui est techniquement atteignable dans une conception nécessairement radicalement cohérente.