

## Consommation d'énergie d'un véhicule : électrique vs thermique ?

**Etudiants :**

<b>Antonin Gibbe</b>	<b>Brieuc Tastard</b>
<b>Candice Delfosse</b>	<b>Cécile Gardeil</b>
<b>Gabin Chanteloup</b>	<b>Gabriel Bréjaud</b>

**Enseignant-responsable du projet :****Tanguy Davin**



Date de remise du rapport : **14/06/2024**

Référence du projet : **STPI/P6/2024 – 045**

Intitulé du projet : **Consommation d'énergie d'un véhicule : essence ou électrique ?**

Type de projet : ***Bibliographie et simulation numérique***

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

- **déterminer à partir d'un bilan des forces la différence de consommation entre un véhicule électrique et un véhicule à essence**
- **faire les hypothèses nécessaires afin de faire une mise en situation précise**
- **trouver deux modèles de voiture, une électrique, un à essence, comparable, c'est-à-dire puissances et dimensions (poids, surface frontale) similaires**
- **trouver un cycle de test moteur afin de comparer les performances des deux voitures**
- **développer un code permettant de calculer l'énergie consommée en fonction des données entrées/fournies**

Mots-clefs du projet (4 maxi) :

***voiture – moteur – rendement – consommation***

## TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction	6
2. Méthodologie / Organisation du travail	7
3. Travail réalisé et résultats	8
3.1. Mécanique du point matériel appliqué au véhicule	8
3.2. Rendement des moteurs en fonction du régime	9
3.3. Rapports des boîtes de vitesse	10
3.4. Choix des véhicules	11
3.5. Le cycle WLTP	11
3.6. Hypothèses	12
3.7. Étapes du programme informatique	12
3.8. Impact environnemental	14
4. Conclusions	18
5. Bibliographie	20
6. Annexes	22
6.1. Documentation technique	22
6.2. Programme informatique utilisé	22

## NOTATIONS, ACRONYMES

**BEV : BATTERY ELECTRIC VEHICLE**

**HEV : HYBRID ELECTRIC VEHICLE**

**ICE : INTERNAL COMBUSTION ENGINE**

$C_x$  : **COEFFICIENT DE TRAÎNÉE**

**GES : GAZ À EFFETS DE SERRE**

**VE : VOITURE ÉLECTRIQUE**

**MJ/L : MÉGAJOULES PAR LITRES**

## 1. INTRODUCTION

Lors de ce projet, nous chercherons à comparer deux types de voitures différents : les voitures à moteur thermique et les voitures électriques.

Plus largement, ce projet a pour objectif de comparer des moteurs complètement différents.

Le premier, le moteur thermique, fonctionne grâce à la combustion d'essence ou de diesel. Ce procédé est très efficace mais émet du CO<sub>2</sub>, gaz à effet de serre participant au réchauffement climatique mais aussi des particules fines.

Le deuxième, le moteur électrique, fonctionne grâce à une batterie. Il a l'avantage de ne pas émettre de CO<sub>2</sub> lors de son utilisation, mais peut cependant questionner sur la provenance de l'électricité qu'il consomme d'une part, mais aussi sur la provenance de ses composants en ce qui concerne la batterie et plus globalement de son cycle de vie.

Ainsi, nous allons devoir faire preuve de rigueur et d'imagination, tant sur nos hypothèses physiques pour rester au maximum cohérent, sur la recherche des forces que nous ajoutons à notre modèle, ou encore sur les voitures que nous souhaitons étudier en particulier pour la prise en compte de données comme la masse du véhicule, sa surface frontale ou encore le rayon de ses pneus. En effet, plus notre modèle sera cohérent et complet, plus le résultat sera fiable et précis, permettant une conclusion réaliste.

Aussi, pour ce faire, et n'ayant pas les modèles de voiture souhaités à disposition, nous devons développer notre modèle physique dans un programme informatique (ici python). Celui-ci aura l'avantage d'être facilement modifiable, permettant ainsi d'éditer nos données ainsi que les forces que l'on applique.

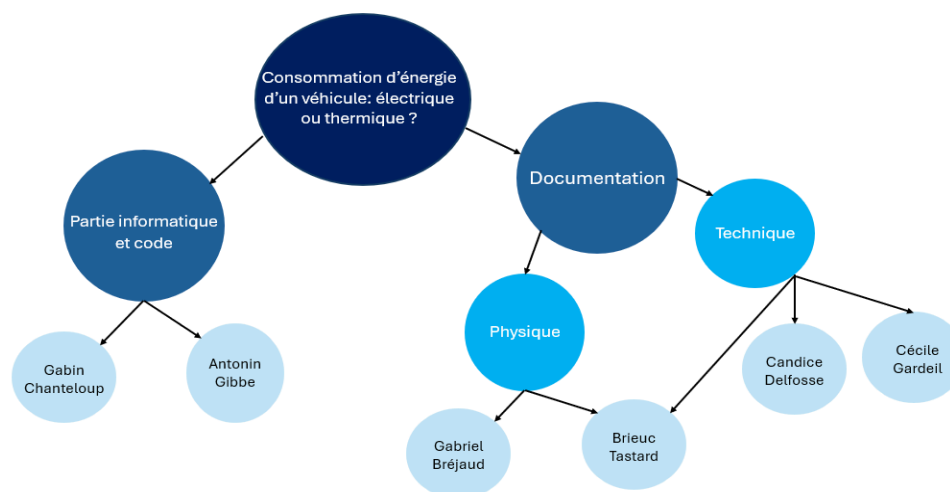
## 2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Durant les deux premières séances, nous avons d'abord dû nous familiariser avec le sujet. Après avoir compris nos objectifs, nous avons commencé ensemble à effectuer un bilan des forces afin d'obtenir une formule qui nous guidera par la suite. Une fois la formule obtenue, nous avons pu nous attribuer les tâches par groupe afin d'être le plus efficace possible.

Nous nous sommes donc séparés en trois groupes qui se sont focalisés chacun sur des parties différentes du projet : un groupe qui s'occupe de l'informatique, un autre de la physique et le dernier de la recherche. Candice Delfosse et Cécile Gardeil qui s'occupent de la recherche ont eu pour responsabilités d'établir des pistes et des hypothèses : elles ont cherché des graphiques à propos du rendement du moteur en fonction du couple et de la vitesse du moteur. Ensuite, en fonction des graphiques choisis, elles ont trouvé les modèles de voiture qu'on allait étudier en particulier puis elles ont cherché à quoi correspondaient les différentes composantes de l'équation bilan, elles ont également traduit les graphiques en tableaux à doubles entrées pour permettre aux étudiants s'occupant de la partie informatique de transformer ses données en une fonction d'interpolation capable de donner une valeur de rendement précise.

Le deuxième groupe avait en charge la partie informatique. L'objectif de ce groupe a été de mettre en place un code pertinent, capable de faire une simulation permettant de nous donner la consommation d'une voiture en fonction des données connues. Gabin Chanteloup et Antonin Gibbe se sont occupés de cette partie.

Le troisième groupe constitué de Gabriel Bréjaud et Briec Tastard, a assumé quant à lui, la partie physique. Il a fallu dans un premier temps approfondir la formule obtenue lors du bilan des forces. Ensuite, ce groupe a travaillé sur une proposition de solution mathématique au problème du rendement des moteurs, sur des méthodes d'interpolation par exemple, en parallèle des recherches du premier groupe.



### Organigramme de la répartition du travail

De façon générale, chaque groupe avait besoin des données, informations et conclusions des 2 autres groupes pour avancer, nous avons donc dû communiquer régulièrement pour faire progresser notre projet, nous avons fait un groupe sur un réseau social pour interagir en dehors de notre créneau de projet P6, nous avons tenu des meetings chaque deux semaines pour évaluer ce qu'il restait à faire et adapter notre travail régulièrement . Nous avons également créé un Drive dans lequel chacun mettait les résultats

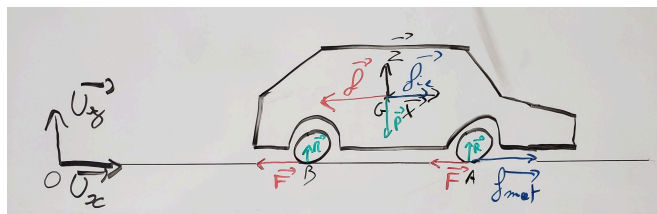
de ses recherches au fur et à mesure, ce qui nous a permis d'avoir une bibliographie générale complète et d'avoir une vue d'ensemble sur le projet.

### 3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

L'objectif de ces recherches est de déterminer la puissance délivrée par le moteur et donc la consommation de carburant à partir de la vitesse de la voiture. Pour cela, nous avons choisi de concentrer nos recherches sur des données de rendement en fonction d'une vitesse de rotation. En effet, en ayant la vitesse de la voiture en ligne droite, nous pouvons facilement, grâce au diamètre de la roue, déterminer une vitesse de rotation. Nous nous sommes demandés si la vitesse de rotation du moteur et des roues était la même.

#### 3.1. Mécanique du point matériel appliqué au véhicule

Dans un premier temps, il nous faut réaliser le principe fondamental de la dynamique sur le véhicule pour mieux appréhender les forces qui s'exercent sur celui-ci et en déduire l'énergie nécessaire pour avancer. En effet, nous cherchons à savoir quels sont les efforts appliqués à ce dernier pour pouvoir les modéliser via l'outil informatique et donc par la suite, savoir ce qui dissipe de l'énergie pour que le moteur apporte exactement l'énergie nécessaire à faire avancer le véhicule tout en respectant les cycles de tests qui sont communs à tous les constructeurs automobiles.



*figure 1* : Schéma regroupant les forces s'exerçant sur un véhicule en mouvement

#### Bilan des forces :

- Poids s'appliquant en G :  $\vec{P} = -mg\vec{Z}$
- Force de réaction normale à la route sur les pneus :  $\vec{R} = R\vec{Z}$
- Frottements solides cinétiques en rotation sur les quatre pneus :  $\vec{F}_{tot} = -mg\mu\vec{X}$   
 $\mu = 0,01$  [1]
- Forces de frottement fluide :  $\vec{f} = -\frac{1}{2}\rho SC_x v^2 \vec{X}$  [2]
- Force d'inertie d'entraînement :  $\vec{f}_{ie} = -ma_e \vec{X}$  où l'accélération relative correspond à l'accélération de G par rapport à O
- Force motrice :  $f_{mot}$

#### Théorème de la puissance cinétique :



Les forces de réaction de la route et le poids se compensent, on peut donc ne pas les prendre en compte lors de l'application du théorème de la puissance cinétique.

$$W(f_{mot}^{\rightarrow}) = \frac{1}{2}m\Delta(v^2) - \int_A^B (\sum \vec{F} \cdot d\vec{l}) \text{ où } \vec{F} \text{ comprend toutes les forces sauf la force motrice.}$$

Après un changement de variable on obtient :

$$W(f_{mot}^{\rightarrow}) = \frac{1}{2}m\Delta(v^2) - \int_{t_A}^{t_B} (\sum F * v) dt$$

De cette manière, en intégrant selon le temps, sur toute la durée de l'étude, on peut trouver l'énergie délivrée par le moteur :

$$E(f_{mot}^{\rightarrow}) = \int_{t_A}^{t_B} (\frac{1}{2}m\Delta(v^2) - \int_{t_A}^{t_B} (\sum F * v) dt) dt$$

Via le principe fondamentale de la dynamique et le théorème de la puissance cinétique, nous avons une formule simple que nous pouvons résoudre via un programme informatique pour proposer une solution au problème posé qui est de savoir quelle est l'énergie consommée par un véhicule thermique et électrique.

### 3.2. Rendement des moteurs en fonction du régime

#### 3.2.1. Moteurs électriques

Nous avons cherché les données relatives aux rendements des moteurs électriques et thermiques en fonction de la vitesse de rotation du moteur. On a donc trouvé deux tableaux et/ou graphiques permettant d'avoir le rendement en fonction d'une vitesse de rotation. Nous avons obtenu ce graphique concernant un moteur électrique :

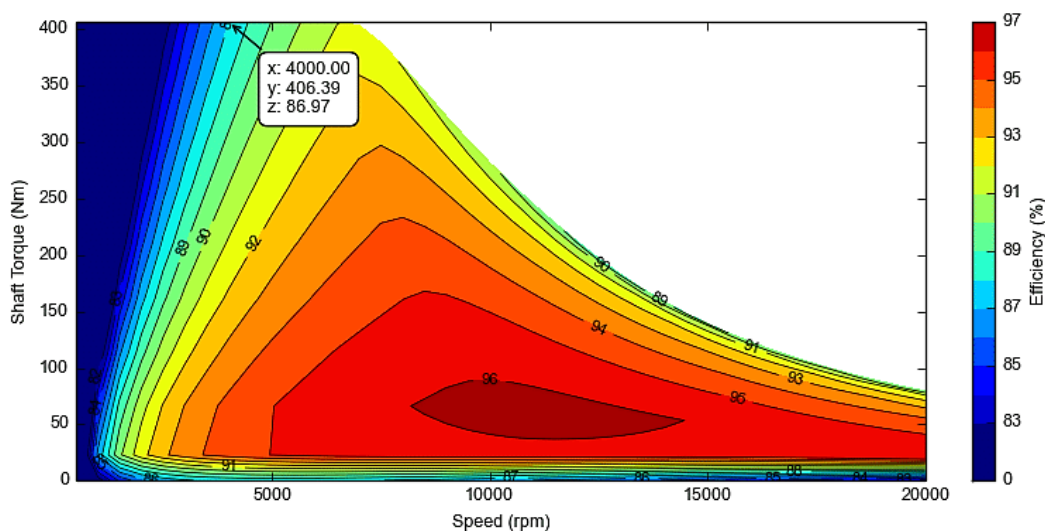
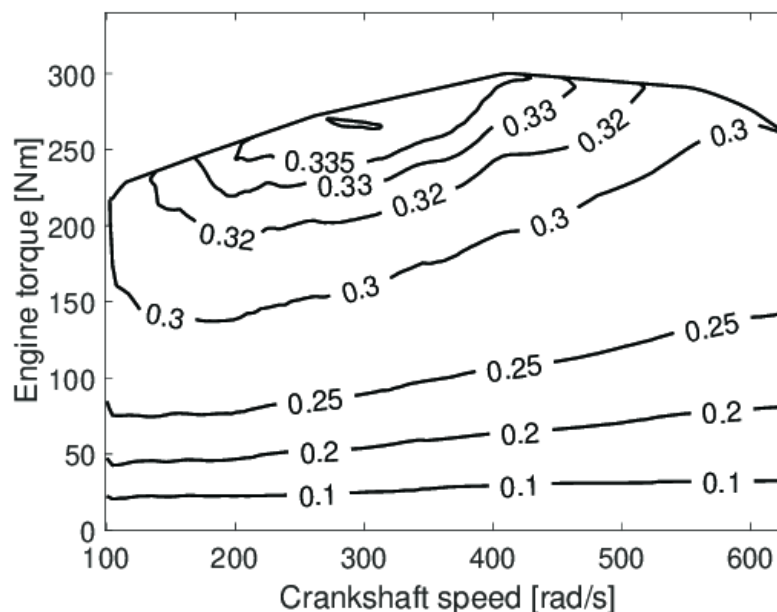


figure 2 : Graphique du rendement d'une voiture électrique à partir du couple et de la vitesse angulaire [3]

Ces rendements sont typiques d'un moteur électrique. En effet, on peut voir qu'ils varient de 83% à 97%, ils sont donc très importants comparés à ceux du moteur thermique, dont les rendements sont beaucoup plus faibles.

### 3.2.2 Moteurs thermiques

Voici le graphique utilisé pour le moteur thermique:



*figure 3* : Graphique du rendement d'une voiture essence à partir du couple et de la vitesse angulaire des roues [4]

Comme attendues, les valeurs de rendement pour une voiture essence sont beaucoup plus faibles que pour une voiture électrique, avec un maximum de 33,5%. En revanche, nous pouvons voir que ces deux graphiques suivent la même tendance : les lignes de niveau forment des cercles. Pour utiliser informatiquement les données de ces graphiques, nous les avons transcrites sous forme de tableau de valeurs numériques. Ainsi, les valeurs de rendement peuvent être manipulées par le groupe travaillant sur la partie code pour optimiser leur programme.

### 3.3. Rapports des boîtes de vitesse

Pour déterminer la vitesse de rotation des moteurs à partir de la vitesse linéaire, il nous fallait les rapports de vitesse des boîtes de vitesse de chaque véhicule. En effet, la boîte de vitesses permet de dissocier la vitesse de rotation du moteur et celle des roues. Elles sont composées d'une série d'engrenages et d'arbres qui permettent d'avoir plusieurs rapports de vitesse en fonction du rapport engagé (les VE ne possèdent pas de boîte de vitesse à proprement parler, mais elles ont quand même quelques trains d'engrenages réducteurs qui causent un rapport de de vitesse constant). La vitesse d'entrée est celle du moteur, et celle de sortie est celle des roues. Ainsi, cela permet d'être dans un rendement correct, car comme on peut le voir sur les graphiques, si la vitesse de rotation du moteur est

trop élevée ou trop basse, la différence de rendement est significative comparé au rendement maximum. Il faut donc un mécanisme permettant d'adapter la vitesse de rotation du moteur en fonction de celle des roues.

Nous avons donc recherché des données relatives aux rapports de vitesse. Or, nous avons rencontré beaucoup de difficultés à trouver des données qui soient à la fois fiables, et qui correspondent aux véhicules que l'on avait sélectionnés. Et bien que cette information soit nécessaire pour déterminer la vitesse de rotation du moteur, nous avons donc décidé de ne pas les prendre en compte dans notre partie code. Néanmoins, les résultats que nous obtenons sont plutôt cohérents, étant donné qu'ils sont proches de ceux disponibles sur internet. On peut donc en déduire qu'en faisant le quotient des deux valeurs d'énergie dépensées sur un parcours pour les deux véhicules, les erreurs causées par le manque de cette information diminuent. Cela peut aussi s'expliquer qu'en l'absence de boîte de vitesse, la vitesse de rotation des moteurs est la même. De plus, pour un couple fixe, et dans une plage de données de vitesse comprise entre 0 et 5000 rpm, on peut voir que la valeur du rendement de la boîte de vitesse de la VE varie peu, ce qui pourrait expliquer que nos résultats soient assez proches de la réalité, car c'est bien le rapport de vitesse des VE sont importants comparés à ceux des véhicules thermiques (le rapport de réduction est de 13 pour l'électrique contre environ 4 à 0.5 pour le thermique).

### 3.4. Choix des véhicules

Nous avons eu des difficultés à trouver de bons graphiques décrivant le rendement du moteur en fonction de la vitesse de rotation et du couple des roues. En effet, ces données ne sont pas souvent partagées par les entreprises, ou du moins difficilement accessibles. Nous avons donc adapté notre choix de voiture en fonction de ces graphiques. Ceux-ci sont valables pour les voitures d'une puissance d'environ 200 kW.

C'est pourquoi, pour notre modèle de voiture électrique, nous avons choisi l'Audi Q4 E-tron, et pour la voiture thermique le Land Range Rover Sport SDV6 de 2018. [\[5\]](#) [\[5bis\]](#) [\[5ter\]](#)

	Land Range Rover	Audi Q4 E-tron
<b>Poids (en kg)</b>	<b>2195</b>	<b>2145</b>
<b>Dimension (L x l x h en m)</b>	<b>4.88 x 1.98 x 1.80</b>	<b>4.90 x 1.90 x 1.63</b>
<b>Puissance (en kwh)</b>	<b>250</b>	<b>250</b>

*figure 4 :* Tableau de comparaison des voitures

### 3.5. Le cycle WLTP

Afin d'avoir un test représentatif de ce qu'une voiture pourrait consommer lors d'un trajet, on a utilisé les cycles de tests WLTP dans la modélisation informatique. Ce cycle est utilisé sur des bancs de test, il fournit des données aux constructeurs, notamment à propos de la consommation du véhicule et des rejets de gaz à effet de serre.

Ces tests sont réalisés en associant une vitesse à un temps donné. Par exemple, pour modéliser un trajet sur une autoroute, la vitesse de la voiture sera poussée jusqu'à 130 km/h pendant 30s. Ainsi toutes les données nécessaires seront récoltées pendant ce temps. Il y a aussi des phases modélisant la conduite en ville, sur des routes à moyenne vitesse, etc. Ces différentes phases permettent d'avoir un test assez représentatif de la réalité. On utilise donc ces différentes vitesses et temps pour avoir une modélisation correcte.

### 3.6. Hypothèses

- Le référentiel terrestre est supposé Galiléen sur la durée de l'étude.
- Le parcours de test ne contient que des lignes droites, de ce fait, les forces d'inertie de Coriolis sont négligées.
- Le parcours de test est considéré plat.
- Le parcours est supposé à l'abri du vent.
- On considère lors du test la température moyenne en France : 13°C d'après la moyenne de 1991 à 2020 avec une pression de 1 bar. [6]
- Le rapport fixe de transmission du véhicule électrique est calculé selon la cohérence des données mises à notre disposition, faute de mieux.
- On ne prend pas en compte les frottements des pièces dans le moteur dans notre rendement faute de documentation et compte tenu de la complexité de la mise en œuvre d'un modèle d'une telle précision.
- Le graphique de rendement d'un moteur électrique est supposé correspondre à celui du véhicule étudié faute de meilleures informations.

L'objectif de ces hypothèses est de simplifier l'étude pour la rendre compatible avec le manque de données dévoilées par les constructeurs automobiles concernant leurs véhicules. Cependant, ces hypothèses ont été faites dans l'optique d'avoir un modèle au plus proche possible de la réalité.

### 3.7. Étapes du programme informatique

L'objectif de ces travaux informatiques est de manipuler simplement des calculs pour obtenir rapidement des résultats. Nous avons donc implémenté un ensemble de fonctions pour aboutir à une estimation de la consommation des deux véhicules sur un parcours donné. Notre démarche fut la suivante.

Pour commencer, nous avons fait un premier bilan des forces s'appliquant sur la voiture pour obtenir une formule nécessaire à notre simulation. Cette formule étant facilement modifiable, nous avons pu rapidement passer à l'étape suivante.. À l'aide de données trouvées sur le site de l'UNECE, permettant aux constructeurs d'effectuer des tests moteur, nous avons obtenu des cycles de vitesses et d'accélération paramétrés par le temps, que nous avons utilisés comme données pour le bilan des forces. Ces données couvrent 1800 secondes, soit 30 minutes, séparées en 4 tests : "Low", "Middle", "High", "Extra-high" pour représenter plusieurs phases de conduite dans lesquelles on accélère plus ou moins.

Pour obtenir l'énergie dépensée à partir de la résultante des forces, nous avons effectué son intégrale par rapport au temps, en utilisant une méthode d'intégration rectangulaire. Les intervalles de temps du cycle sont d'une seconde, c'est pourquoi le temps n'apparaît pas dans le code. Nous aurions pu utiliser une autre méthode d'approximation de l'intégrale (par des trapèzes par exemple), mais puisque nous voulons seulement comparer la consommation énergétique du moteur électrique avec celui à essence, notre méthode convient amplement. Grâce à cela, nous avons pu obtenir des premiers résultats. Ceux-ci n'étaient pas concluants étant donné nos nombreuses approximations et hypothèses.

Nous nous sommes ensuite concentrés sur l'ajout d'un rendement énergétique au niveau du moteur pour simuler les pertes dues au frottement des pièces mécaniques. Nous avons considéré le rendement d'une voiture à essence d'environ 0.34 et celui d'une voiture électrique 0.94 (selon les graphiques dans la partie 3.2 Rendement des moteurs en fonction des régimes).

Ce modèle n'est pas réaliste car en pratique, il faut prendre en compte le fait que le rapport varie en fonction de la vitesse angulaire de l'arbre moteur ainsi qu'en fonction du

couple fourni. De ce fait, nous avons dû adapter notre code pour prendre ces variations en compte.

Grâce aux tableaux obtenus à partir des Figures 1 et 2, nous avons défini des fonctions d'interpolation, pour le moteur électrique comme pour le moteur thermique. De plus, nous avons codé une fonction pour calculer la vitesse angulaire des roues grâce à la vitesse de la voiture et au rayon des roues, ainsi qu'une fonction qui calcule le couple du moteur à partir de la puissance du moteur et de la vitesse angulaire des roues. De cette manière, nous obtenons une approximation cohérente du rendement du moteur à chaque instant grâce à la vitesse de la voiture et à la taille des roues.

À ce stade de l'étude, nous obtenons qu'une voiture électrique consomme 4,8 fois moins qu'une voiture thermique :

Ethermique : 122 MJ

Eélectrique : 26 MJ

Ethermique / Eélectrique = 4.7

Il nous reste à prendre en compte une chose. Le dE que l'on calcule, soit l'énergie consommée instantanément, est négative lorsque la voiture ralentit. Cette énergie se dissipe et est en pratique entièrement perdue dans un véhicule essence, ce qui se traduit dans notre programme par: si le dE calculé est positif, alors dE=0. Pour autant, les voitures électriques sont capables de recharger légèrement leur batterie à partir de cette énergie, grâce à une dynamo. Cette recharge n'est bien sûr pas totale, elle a en moyenne un rapport de 0.17 [7]. Nous avons donc ajouté ce rapport de récupération d'énergie au véhicule électrique.

Ainsi, suite à l'implémentation de ce code, nous obtenons deux graphes :

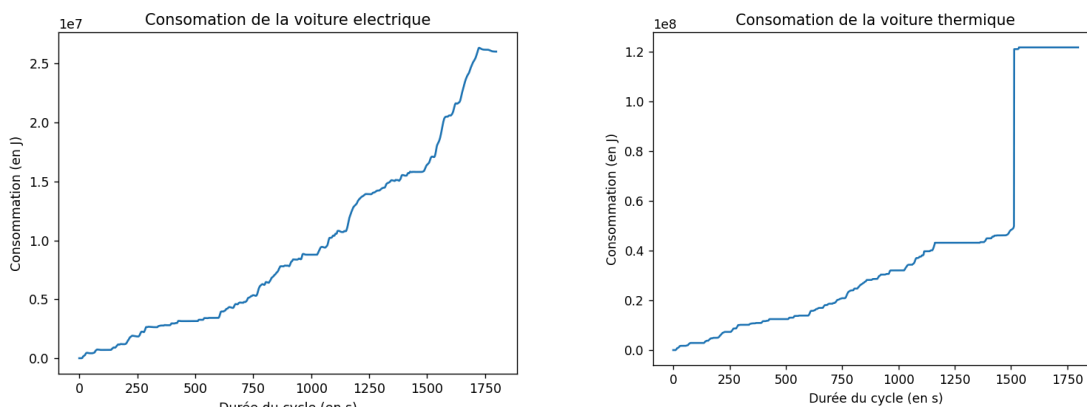


figure 5 : Graphes montrant l'énergie totale dépensée par le véhicule en fonction du temps (moteur électrique - moteur thermique) en Joules et secondes

Notes : la rapide accélération de la consommation aux alentours de 1500 secondes pour le moteur thermique, celui-ci est dû à une accélération brutale et rapide dans le cycle proposé par les fabricants de voitures que nous utilisons dans notre programme. Elle est aussi perceptible sur le premier graphe, mais de manière plus légère à cause des rapports qui diffèrent et de la dynamo présente sur la voiture électrique.

Pour pouvoir mieux visualiser ces données, nous allons supposer que le moteur thermique consomme du sans plomb 95. Nous faisons un calcul en utilisant le PCI du SP95

qui est de 32 MJ/L [8]. Ainsi, en 30 minutes, la voiture électrique consomme, environ  $2,6 * 10^7$  J soit 0.8 L, en équivalent SP95, quand la voiture thermique consomme environ  $1,2 * 10^8$  J soit 3.8 L. Pour le véhicule thermique, cela correspondrait à environ 16,3 L pour 100 km. Cette consommation est assez élevée mais reste cohérente en ordre de grandeur, pour le type de véhicule étudié. Il faut garder à l'esprit que la boîte de vitesses n'a pas été prise en compte, ce qui provoque une augmentation de la consommation.

Il est important de noter que ces valeurs ne sont que des approximations, puisque nous avons fait des hypothèses, citées précédemment.

*Informations admises :*

La masse de la voiture électrique et thermique sont similaires, 2145 pour l'électrique et 2195 pour le thermique.

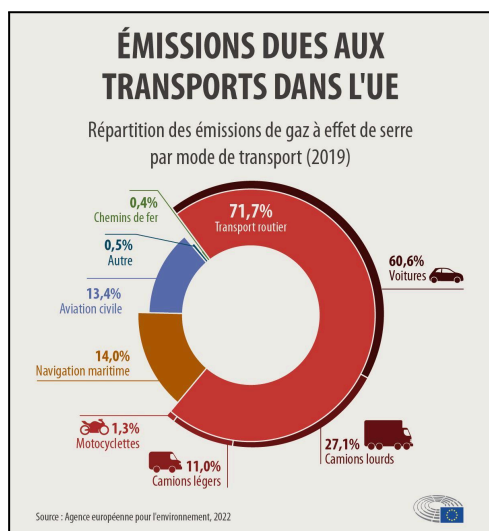
La voiture ne roule que sur le plat et en ligne droite, donc notre cycle ne représente pas une utilisation réelle.

Les forces étudiées sont celles de la partie 3.1 (Mécanique du point matériel appliqué au véhicule).

L'ensemble du programme est en annexe, sans les données de vitesse et d'accélération car elles prendraient trop de place.

### 3.8. Impact environnemental

#### 3.8.1. Production GES



L'impact environnemental des transports est une préoccupation majeure dans le cadre de la réduction de gaz à effet de serre car ce secteur représente (x% des émissions globales). Les voitures, en particulier, sont souvent pointées du doigt car elles contribuent pour plus de 40% des émissions de gaz à effet de serre de ce secteur.

“Les gaz à effet de serre, ou GES, sont des gaz qui absorbent une partie des rayons solaires en les redistribuant sous la forme de radiations au sein de l'atmosphère terrestre, un phénomène appelé effet de serre.” [9]

figure 6 :

graphe des émissions par transports

En effet, le transport est le seul secteur où les émissions de gaz à effet de serre ont augmenté au cours des trois dernières décennies, avec une hausse d'environ 33,5 % entre 1990 et 2019. [10]

Cependant, de nombreux facteurs peuvent influencer l'évaluation de l'empreinte carbone d'une voiture, notamment :

- La distance parcourue par le véhicule
- Le poids du véhicule : un véhicule plus lourd (ex : SUV) consomme plus d'énergie pour rouler, mais également plus d'énergie et de matière pour être fabriqué.
- Le type de carburant utilisé dans le cas des véhicules thermiques
- Les comportements individuels : éco-conduite, utilisation intensive du chauffage ou de la climatisation, etc. [11]

Selon le type de carburant

Type de carburant	Rejet de CO2 pour 1 litre de carburant
Essence	2,28 kilos de CO2
Gazole	2,67 kilos de CO2
Sans Plomb 95 E10	2,21 kilos de CO2
GPL	1,66 kilos de CO2
Ethanol E85	1,61 kilos de CO2

D'après les chiffres de BFMTV.

D'après BFMTV, voici quelques chiffres concernant le rejet de CO2 d'une voiture en fonction du type de carburant utilisé. [12]

figure 7 : rejet de CO2 par type de carburant

Quant à l'origine de l'émission des gaz à effet de serre, les voitures thermiques en rejettent principalement lors de la combustion de carburants fossiles, en incluant également les émissions liées à l'extraction, le raffinage et la distribution du pétrole. Les principaux GES émis sont le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O).

Selon l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), un véhicule essence émet en moyenne 2,3 kg de CO<sub>2</sub> par litre de carburant consommé, tandis qu'un véhicule diesel en émet environ 2,7 kg par litre. Les véhicules électriques, quant à eux, n'émettent pas de GES lors de leur utilisation directe. En effet, les GES concernent surtout la production et le transport de l'électricité nécessaire à la recharge de la voiture. [13]

Enfin, d'après une étude de l'International Council on Clean Transportation (ICCT), les émissions de CO<sub>2</sub> d'un VE dépendent du mix énergétique du pays où il est utilisé. Par exemple, en France, où l'électricité est majoritairement d'origine nucléaire et renouvelable, les émissions sont très faibles (environ 30 g CO<sub>2</sub>/km). En revanche, dans des pays comme la Chine, où le charbon domine, ces émissions peuvent atteindre 150 g CO<sub>2</sub>/km. [14]

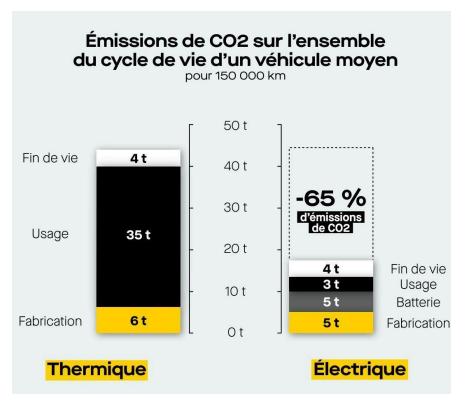
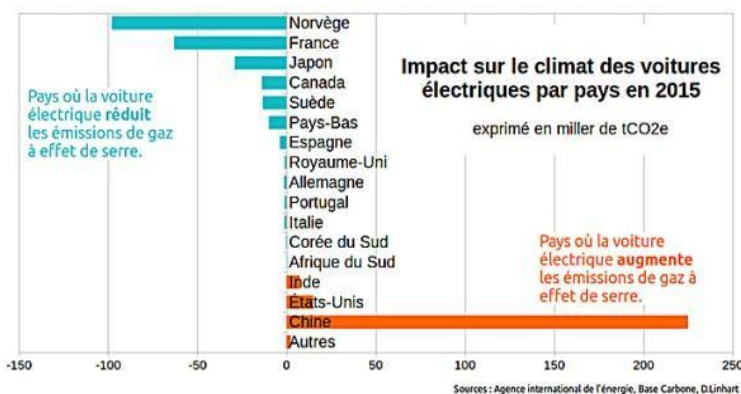


figure 8 : impacts sur climat d'un véhicule moyen

### 3.8.2. Cycles de vie

“Le but d’un cycle de vie est de connaître et pouvoir comparer les impacts environnementaux d’un système tout au long de son cycle de vie, de l’extraction des matières premières nécessaires à sa fabrication à son traitement en fin de vie (mise en décharge, recyclage...), en passant par ses phases d’usage, d’entretien et de transport.” [15]

L’impact environnemental lors de la fabrication du véhicule électrique est élevé mais reste minime par rapport à celui évité lors de son utilisation si on compare les véhicules électriques et ceux à moteur thermique.

Ce n’est peut-être pas évident au début de l’utilisation de la voiture électrique, mais sur le long terme, plusieurs études ont démontré que le bilan environnemental des BEV, par rapport à celui d’un ICE est positif pour les critères suivants [16] :

- Impact sur l’écosystème
- Émissions de GES
- Épuisement des ressources fossiles
- Impacts sur la santé humaine

Ces données sont fournies en tenant compte du cycle de vie, c’est-à-dire que non seulement l’utilisation du véhicule est prise en compte, mais également la production de ses pièces (dont la batterie qui reste l’élément le plus impactant écologiquement parlant), le transport vers les magasins de vente, souvent le transport vers l’utilisateur et finalement sa fin de vie, comment il est recyclé ou juste éliminé de la circulation. C’est là tout l’intérêt du cycle de vie.

Nous pouvons observer dans les figures suivantes la différence entre les cycles de vie d’une voiture électrique et d’une voiture thermique :

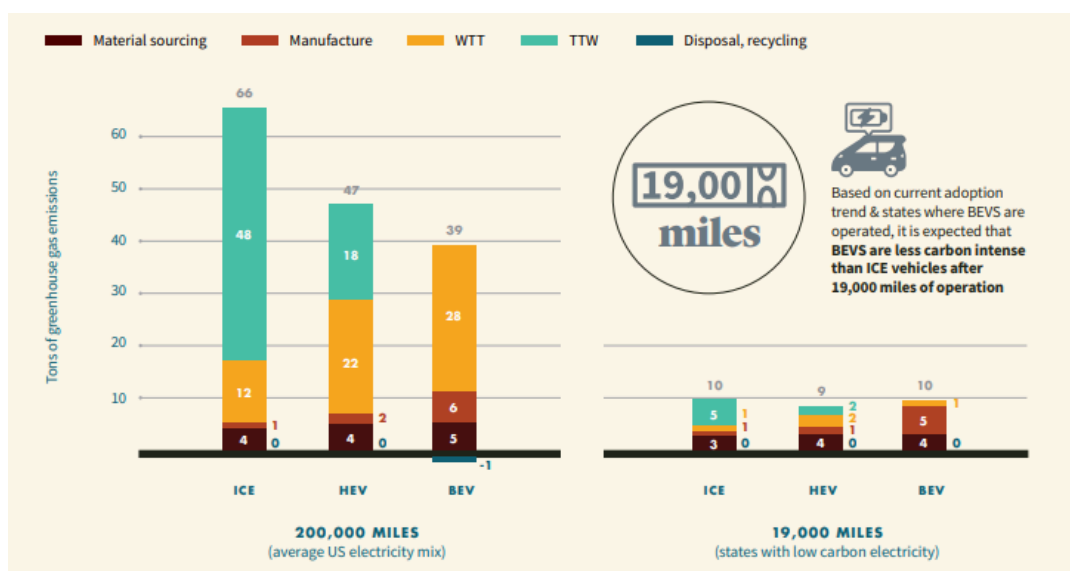


figure 9 : Comparaison des gaz à effets de serres émis dans le cycle de vie d’une voiture électrique et thermique, sur deux différentes pages de données [17]

Ici, nous nous intéressons seulement aux véhicules ICE (thermique) et aux véhicules BEV (électrique). Nous pouvons voir deux graphiques. Dans le bilan effectué sur 19 000



miles (soit environ 30 000 km), on peut observer que l'émission totale est environ la même, même si provenant de différents domaines. Ainsi, avant une certaine distance parcourue par chaque véhicule, on peut voir que la voiture à essence peut être plus avantageuse en termes de consommation et d'émission. Cela dit, il est important de constater que cette distance est assez limitée. En effet, peu d'utilisateurs veulent acheter une voiture pour rouler seulement 30 000 km.

C'est donc là que la véritable différence se fait. Dans le deuxième graphe, on peut observer une nette distinction entre les véhicules électriques et thermiques, la différence notable étant la consommation d'essence qui fait augmenter exponentiellement l'émission des gaz à effets de serre pour les véhicules thermiques, le CO<sub>2</sub> en particulier.

Vous pouvez voir en annexe dans la partie 'Documentation technique' [\[18\]](#) une autre étude réalisée cette fois à l'échelle mondiale où l'on peut voir dans chaque pays ou continent cette comparaison entre les voitures électriques et thermiques. Le résultat est clair : les voitures à essence émettent plus de CO<sub>2</sub> que les voitures électriques.

Sachant que les producteurs offrent généralement une garantie de 8 ans, soit environ 160 000 km (la durée d'une vie de batterie dépassant cette période), et que le bilan environnemental devient plus favorable pour les voitures électriques à partir d'environ 30 000 km d'utilisation, on peut en conclure, suivant les études, qu'à condition de ne pas avoir d'accident, une utilisation de voiture électrique est plus avantageuse pour nous comme pour l'environnement.

En outre, de plus en plus de nouveaux véhicules électriques sont fabriqués à partir de batteries de véhicules en fin de vie, ce qui est considéré comme une émission négative de GES, en plus d'être un véritable bénéfice en matériaux pour les constructeurs automobiles, car les batteries en fin de leur vie « utile », sont utilisées pour stocker de l'énergie et allonger la vie d'autres véhicules électriques.

	Électrique	Thermique
Energie consommée (équivalent en essence) en L/h	1.6 (7.1 kWh)	7.6
CO2 rejeté en kg/h	0.425	17.33
Durée de vie	environ 160 000 km	environ 200 000 km
Emission GES après 30 000 km parcourus	10 tonnes	10 tonnes
Emission GES après 320 000 km parcourus	39 tonnes	66 tonnes

*figure 10* : Tableau récapitulatif de comparaison électrique/thermique

#### 4. CONCLUSIONS

##### **Conclusion sur le travail réalisé :**

En conclusion, nous pouvons noter que les véhicules électriques ont une consommation d'énergie moins importante que les véhicules thermiques lorsque l'on prend en compte la récupération d'énergie. En effet, par le biais de la récupération d'énergie, notamment au freinage, les véhicules électriques ont pour avantage de se recharger partiellement. Nous avons également pu montrer que l'utilisation des véhicules électriques est favorable en terme d'impact environnemental car ces derniers n'émettent pas de gaz à effets de serre contrairement aux véhicules thermiques. En plus du fait que ces derniers soient également responsables de l'augmentation du taux de particules fines dans l'air, notamment en zones urbaines. Cependant, si on analyse le cycle de vie complet des voitures électriques, on se rend compte que ces dernières sont sources d'une plus grande quantité de déchets et présentent des difficultés en termes de recyclage, notamment au niveau de la batterie. Ces véhicules restent malgré tout plus respectueux de l'environnement et semblent être une bonne alternative en termes de moyen de déplacement pour les années à venir tout en poussant l'innovation dans l'optique de recycler les batteries.

##### **Conclusion sur l'apport personnel de cet E.C. projet :**

Ce projet nous a permis de prendre conscience des enjeux écologiques que représentent l'utilisation des différents types de véhicules en ajoutant à l'approche habituelle une approche scientifique.

Ce projet nous a également permis de nous initier à la recherche documentaire, ainsi qu'à l'analyse des informations que nous trouvions, tout en travaillant en équipe. Ceci fut un véritable challenge étant donné que ce projet est le plus conséquent que nous ayons mené à bien. Ainsi, nous avons amélioré notre communication au cours du temps, en allant à l'essentiel et en nous répartissant intelligemment les tâches. Ce projet nous a conduit à développer notre confiance mutuelle, indispensable pour réaliser ce travail. De plus, ce projet a été un travail de mise en commun de différents types d'activité, de l'informatique à de la recherche documentaire. Ce fut une tâche intéressante, permettant de mettre en perspective et de confronter les résultats que nous trouvions au fur et à mesure des séances. Nous avons pu utiliser nos compétences en physique et en informatique ensemble. Enfin, ce projet a permis de développer notre imagination, pour rechercher les informations les plus pertinentes, pour essayer de répondre à nos interrogations, mais aussi pour le programme informatique, pour obtenir un modèle le plus cohérent possible.

Néanmoins, nous avons rencontré de nombreuses difficultés lors de la réalisation de ce projet. En effet, le fait de travailler en groupe nous poussait à faire nos recherches en plus petites équipes afin de mieux se répartir le travail. Or, il nous a fallu quelques séances avant de le comprendre, ce qui nous a fait perdre du temps. De plus, ce mode de fonctionnement a créé des incompréhensions et des malentendus entre les groupes. En effet, il y a eu quelques manques de coordination, qui nous ont à nouveau fait perdre du temps. Ces difficultés nous ont permis de mieux appréhender le travail en équipe et nous avons pu nous rendre compte des difficultés auxquelles les ingénieurs font face, lors de la réalisation de leur projet, ou plus généralement dans le monde de l'entreprise.

En ce qui concerne la partie informatique, il n'a pas été facile d'arriver à donner un sens physique aux données manipulées. En effet, il fallait bien comprendre les enjeux de chaque ajout et bien avoir en tête que les données trouvées pouvaient évoluer avec les recherches effectuées. Ainsi, il fallait garder un code facilement éditable et pour lequel on pouvait éditer les valeurs.

Pour la partie recherche, le principal écueil a été de trouver les données nécessaires à la réalisation du code. Il fallait rechercher des données très spécifiques (exemple : les graphiques des rendements) qui n'étaient pas fournies par les constructeurs. Nous devons donc chercher ces informations sur d'autres sites Internet, mais tout en gardant en tête qu'il fallait des données fiables. De plus, il fallait que ces données correspondent aux voitures choisies. Nous devons donc composer entre les contraintes imposées par les véhicules et le manque d'informations fiables.

Pour la partie physique, le problème majeur rencontré a été de bien faire l'équation bilan. Pour cela, il fallait comprendre les forces entrant en action et rechercher les données qui leur étaient associées (exemple : coefficient de traîné pour la force de frottement fluide). Ainsi, comme pour la partie recherche, la rareté de données correctes était ralentissante.

## 5. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Coefficient de friction de roulement : <https://ena.etsmtl.ca/mod/book/view.php?id=50392&chapterid=212#:~:text=Souvent%20on%20parle%20d%27un,%20R%20%20%200.01> (valide à la date du 03/06/2024)
- [2] Formule des forces de frottements fluides à haute vitesse : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Frottement\\_fluide](https://fr.wikipedia.org/wiki/Frottement_fluide) (valide à la date du 03/06/2024)
- [3] Graphique du rendement d'une voiture électrique à partir du couple et de la vitesse angulaire  
[https://www.researchgate.net/publication/334994872\\_Design\\_Analysis\\_of\\_a\\_High\\_Speed\\_Copper\\_Rotor\\_Induction\\_Motor\\_for\\_a\\_Traction\\_Application](https://www.researchgate.net/publication/334994872_Design_Analysis_of_a_High_Speed_Copper_Rotor_Induction_Motor_for_a_Traction_Application) (valide à la date du 03/06/2024)
- [4] Graphique du rendement d'une voiture thermique à partir du couple et de la vitesse angulaire  
[https://www.researchgate.net/figure/Efficiency-map-of-the-ICE-for-engine-torque-against-engine-speed\\_fig2\\_329739353](https://www.researchgate.net/figure/Efficiency-map-of-the-ICE-for-engine-torque-against-engine-speed_fig2_329739353) (valide à la date du 03/06/2024)
- [5] Descriptif modèles voitures électrique et thermique, audi  
<https://www.audi.fr/fr/web/fr/gamme/q4-e-tron/audi-q4-e-tron.html>
- [5bis] Land range rover  
[https://www.lacentrale.fr/fiche-technique-voiture-land+rover-range+rover+sport-ii+\(2\)+3.0+scv6+hse+auto-2018.html?version-id=25782004&modelCom=RANGE%20ROVER%20SPORT%20](https://www.lacentrale.fr/fiche-technique-voiture-land+rover-range+rover+sport-ii+(2)+3.0+scv6+hse+auto-2018.html?version-id=25782004&modelCom=RANGE%20ROVER%20SPORT%20)
- [5ter] Convertisseur CV fiscaux en kWh  
<https://www.kelwatt.fr/guide/compteur/puissance/kw-cv#convertisseur>
- [6] Température moyenne en France  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Climat\\_de\\_la\\_France](https://fr.wikipedia.org/wiki/Climat_de_la_France) (valide à la date du 03/06/2024)
- [7] Rapport de récupération des pertes thermiques d'une voiture électrique  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Freinage\\_r%C3%A9g%C3%A9n%C3%A9ratif](https://fr.wikipedia.org/wiki/Freinage_r%C3%A9g%C3%A9n%C3%A9ratif) (valide à la date du 03/06/2024)
- [8] PCI du SP95  
[https://www.douane.gouv.fr/sites/default/files/uploads/files/2020-08/Annexes\\_circulaire\\_TIRI\\_B.pdf](https://www.douane.gouv.fr/sites/default/files/uploads/files/2020-08/Annexes_circulaire_TIRI_B.pdf) (valide à la date du 03/06/2024)
- [9] Informations Gaz à Effet de Serre  
[https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/gaz\\_a\\_effet\\_d\\_e\\_serre\\_ges.php4](https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/gaz_a_effet_d_e_serre_ges.php4) (valide à la date du 03/06/2024)
- [10] Chiffres augmentation GES  
[https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/gaz\\_a\\_effet\\_d\\_e\\_serre\\_ges.php4](https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/gaz_a_effet_d_e_serre_ges.php4)
- [11]  
<https://www.europarl.europa.eu/topics/fr/article/20190313STO31218/emissions-de-co2-des-voitures-faits-et-chiffres-infographie>

**[12]**

<https://media.roole.fr/transition/voiture-propre/une-voiture-electrique-pollue-plus-quune-thermique-vrai-ou-faux>

**[13]**

<https://www.hellocarbo.com/blog/calculer/co2-voiture/>

**[14]**

<https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/automobile-carburant-emet-plus-co2-essence-gasoil-947/>

**[15]**

[https://bonpote.com/10-notions-indispensables-a-connaître-sur-le-climat/#8\\_Lanalyse\\_de\\_cycle\\_de\\_vie](https://bonpote.com/10-notions-indispensables-a-connaître-sur-le-climat/#8_Lanalyse_de_cycle_de_vie) (valide au 26/05/2024)

**[16]** Informations sur cycles de vie

<https://www.roulonselectrique.ca/fr/guide-du-vehicule/pourquoi-rouler-electrique/meilleur-bilan-environnemental/meilleur-bilan-environnemental/#:~:text=La%20batterie%20et%20sa%20fiabilité%20retrouvent%20pas%20au%20d%C3%A9potoir> (valide au 10/06/2024)

**[17]** Analyse des différents cycles de vie

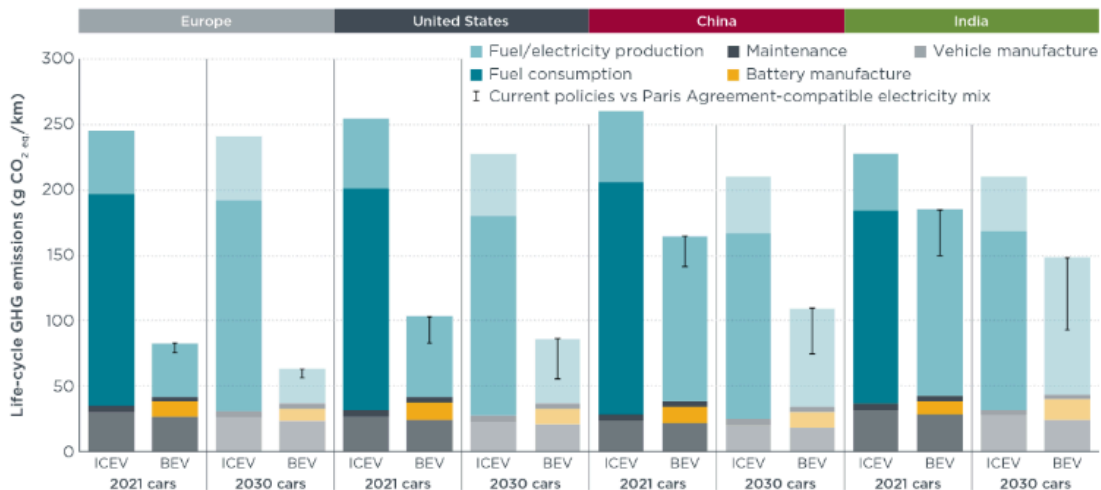
<https://www.transportationenergy.org/research/reports/life-cycle-analysis-comparison-electric-and-internlife-cycle-analysis-comparison-electric-and-intern> (valide au 10/06/2024)

**[18]** Autre exemple de comparaison de cycles de vie

<https://theicct.org/publication/a-global-comparison-of-the-life-cycle-greenhouse-gas-emissions-of-combustion-engine-and-electric-passenger-cars/> (valide au 10/06/2024)

## 6. ANNEXES

### 6.1. Documentation technique



**Figure ES.1.** Life-cycle GHG emissions of average medium-size gasoline internal combustion engine (ICEVs) and battery electric vehicles (BEVs) registered in Europe, the United States, China, and India in 2021 and projected to be registered in 2030. The error bars indicate the difference between the development of the electricity mix according to stated policies (the higher values) and what is required to align with the Paris Agreement.

*Comparaison cycle de vie voiture électrique et thermique, dans plusieurs pays majeurs*

<https://theicct.org/publication/a-global-comparison-of-the-life-cycle-greenhouse-gas-emissions-of-combustion-engine-and-electric-passenger-cars/>

### 6.2. Programme informatique utilisé

```
#####
#####

#
#

#
#
#
#
#
#

#####
#####
```

INITIALISATION DES MODULES UTILES



```

    [0.88, 0.90, 0.93, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1],
    [0.87, 0.90, 0.92, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1]]
g = interp2d(a, b, c)
Z = g(X, Y)
return Z[0]

def interpoleThermique(X, Y):
    a = [954.9296586, 1432.394488, 1909.859317, 2387.324146,
2864.788976, 3342.253805, 3819.718634, 4774.648293, 5252.113122,
5729.577951]
    b = [25, 50, 100, 175, 200, 250, 275, 300, 350, 400]
    c = [[0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.09, 0.09, 0.09],
[0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.19, 0.18, 0.15],
[0.28, 0.28, 0.27, 0.255, 0.26, 0.25, 0.25, 0.24, 0.235,
0.26],
[0.3, 0.31, 0.31, 0.31, 0.305, 0.3, 0.28, 0.28, 0.27, 0.27],
[0.3, 0.318, 0.32, 0.32, 0.32, 0.31, 0.315, 0.29, 0.28, 0.28],
[-1, -1, 0.335, 0.334, 0.335, 0.336, 0.325, 0.317, 0.305,
0.3],
[-1, -1, -1, -1, -1, -1, 0.333, 0.32, 0.31, -1],
[-1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1],
[-1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1],
[-1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1]]
    h = interp2d(a, b, c)
    Z = h(X, Y)
    return Z[0]

# Fonction déterminant la vitesse angulaire du moteur
def vangulaire(v, r):
    return 2*pi*v/r

# Fonction calculant le couple délivré par le moteur

```





```
#####  
#####
```

```
def E(moteur):  
    # Initialisation des variables globales  
    tab = []  
    tab2 = []  
    tab3 = []  
    E = 0  
    R = 0.5834  
    rdynamo = 0.17  
  
    # Pour l'ensemble des vitesses du cycle  
    for i in range(1, 1800):  
        # On détermine le bilan des forces, le couple et la vitesse  
        angulaire  
        dE, a, v = F(i)  
        print('v = ', v)  
        vang = vangulaire(v, R)  
        print('vang = ', vang)  
        print('dE = ', dE)  
        C = couple(dE, vang)  
        print('C = ', C)  
  
        # On agit en fonction de si on considère un moteur thermique ou  
        électrique  
  
        # Si thermique  
        if not(moteur):  
            # Selon si un couple est transmit  
            if C == 0 or C == None:  
                r = 0
```

```
else:
    r = interpoleThermique(C, vang)
    print('r = ', r)

    # Si le rapport ( cad qu'on est dans la zone existante des
valeurs ) est positif et qu'il y a de la consommation
    if r > 0 and dE > 0:
        E = E + dE/r

    # Sinon pas de consommation
else:
    E += 0

# Si electrique
if moteur:
    # Même fonctionnement que pour le thermique
    if C == 0 or C == None:
        r = 0
    else:
        r = interpoleElectrique(C, vang)
        print('r = ', r)

    if r >= 0:
        if dE > 0:
            E = E + dE/r

        # Si la consommation est négative, alors la batterie se
recharge
        else:
            E += dE*rdynamo

print('E = ',E)
tab.append(E)
tab2.append(dE)
```

```
        tab3.append(a)

print(tab)

# On graphe le tableau en fonction du temps
if moteur:
    plt.title('Consomation de la voiture electrique')
else:
    plt.title('Consomation de la voiture thermique')
plt.xlabel('Durée du cycle (en s)')
plt.ylabel('Consommation (en J)')
plt.plot(range(len(tab)), tab)
plt.show()

return E

# Exectution du programme principal
print(E(False))
```