



HAL
open science

Le véhicule électrique de 2023

Patrick Gilliéron

► **To cite this version:**

| Patrick Gilliéron. Le véhicule électrique de 2023. Indépendant. 2023. hal-03993157

HAL Id: hal-03993157

<https://hal.science/hal-03993157>

Submitted on 16 Feb 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright

Le véhicule électrique de 2023

Patrick Gilliéron, chercheur indépendant
rdmfa.pgillieron@orange.fr

Résumé : *la problématique d'utilisation des véhicules électriques, leur typologie puis les équations pour les énergies et les puissances nécessaires aux mouvements sont successivement présentées puis rappelées. Un échantillon de 41 véhicules, testés par le journal ARGUS, est ensuite analysé puis utilisé pour fournir des ordres de grandeur à des valeurs moyennes. Ces valeurs, introduites dans les équations du mouvement, permettent de caractériser les influences de l'accélération, de l'aérodynamique, de la masse, du roulement, de l'altitude, de la température extérieure et de la vitesse sur les énergies, les puissances, l'autonomie et les temps de parcours.*

1. INTRODUCTION

Depuis le début du vingtième siècle, le transport se développe grâce à l'abondance et aux facilités d'extraction et de transport des produits pétroliers, liquides et gaz, dont la combustion émet des produits polluants et des gaz à effet de serre. Ces émissions, cumulées à celles des charbons initiés en Angleterre depuis la révolution industrielle de 1850, sont responsables du dérèglement climatique mis en évidence par le GIEC dès 1988 et clairement identifié comme anthropique. En l'absence de profonds changements quant aux habitudes des habitants des pays les plus industrialisés, limiter le réchauffement climatique sous le seuil des 1.5°C en 2100, voulu par la COP21 de Paris en 2015 [1], ne sera pas possible. Après avoir connu un ralentissement lié à la crise de la Covid-19, les émissions mondiales de CO₂ continuent en effet d'augmenter et dépassent en 2022 celles de 2019 [2, A]. Le réchauffement climatique dépassera ainsi les 1.5°C au début des années 2030 et pourrait conduire à un réchauffement compris entre 4 et 5°C en 2100 si l'évolution des émissions se poursuivait au rythme actuel (scénario SSP3-7.0 et SSP5-8.5 : GIEC AR6 WGI SPM. Technical Summary [3-4, B]).

L'importance des transports dans le total des émissions de gaz à effet de serre étant avérée¹, un forum mondial était organisé à Varsovie les 20 et 21 novembre 2019 pour identifier les moyens de rendre ce secteur plus respectueux du climat [C]. Cette même année, la Commission européenne présentait le pacte vert pour l'Europe (Green Deal) pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 [D] et en 2021 était identifié un ensemble de mesures pour réduire de 55% les émissions de carbone à l'horizon 2030. Ces mesures ont été suivies le 28 juin 2022 par un vote du Parlement Européen pour interdire dès 2035 la vente de véhicules neufs utilisant des carburants non climatiquement neutres [E]. Ne seront alors accessibles à la vente en 2035 que les véhicules électriques (batteries ou pile à combustible) ou fonctionnant à partir de carburants synthétiques.

Les véhicules électriques étant ainsi amenés à remplacer progressivement les véhicules à moteur thermique, ce document propose une analyse sur l'autonomie des véhicules électriques actuellement accessibles à la vente, d'identifier les puissances électriques nécessaires pour conserver les accélérations généralement offertes par les véhicules thermiques, les énergies et les masses de batteries à embarquer pour satisfaire les déplacements de courtes, moyennes et grandes distances.

2. ÉQUIVALENCE D'ÉNERGIE CARBURANTS USUELS/BATTERIES

La combustion des produits pétroliers fournit de la vapeur d'eau qui n'est généralement pas condensée pour récupérer la chaleur latente de changement de phases (vapeur/liquide). Cette énergie de condensation n'étant pas récupérée, il est usuel de quantifier l'énergie contenue dans les carburants à partir de leurs pouvoirs calorifiques inférieurs (notation PCI). Le pouvoir calorifique inférieur des carburants automobiles, essence et gasoil, proche de 43 MJ/kg [F] est à comparer aux 0.54 MJ/kg des

¹ 23% des émissions de CO₂ liées à l'énergie.

batteries² Lithium-ions conditionnées actuellement disponibles. Il y a donc au moins 80 fois plus d'énergie dans un kilogramme d'essence que dans un kilogramme de batteries. Ce rapport justifie à lui seul l'intérêt porté jusqu'à présent à la filière du pétrole pour tous les modes de transport.

En considérant les masses volumiques de l'essence et du gasoil respectivement égales à 0.747 kg/dm³ et 0.832 kg/dm³ à 15°C, les quantités d'énergies contenues dans un réservoir de 50 litres (50 dm³) sont respectivement égales³ à 1606 et 1789 MJ. Pour des rendements des moteurs thermiques de 0.25 [5] du réservoir à la roue, les quantités d'énergie réellement utilisées pour les déplacements des véhicules sont respectivement égales⁴ à 402 et 447 MJ. Pour le véhicule électrique et des rendements de la batterie à la sortie du moteur puis de la sortie du moteur (transmission) à la roue respectivement estimés à 0.90 et 0.80, le rendement global de la batterie à la roue est de 0.72. Pour disposer d'énergies équivalentes à partir de batteries Li-ion conditionnées, chaque véhicule devrait alors respectivement embarquer 1033 et 1150 kg de batteries, voir la figure 1 ; des valeurs à comparer avec la masse à vide des véhicules thermiques de type Mégane⁵ ou Kadjar⁶ de l'ordre de 1300 et 1450 kg. L'industrie automobile n'a donc d'autre choix que de réduire la masse des batteries embarquées au risque de revoir la conception mécanique (châssis, suspension, assistance, système de freinage...) avec ses conséquences sur les prix de revient. Les masses de batteries embarquées sont alors déterminées en fonction des profils d'utilisation ; 180 à 300 kg pour les véhicules à usages urbains ou périurbains, de 300 à 800 kg pour des véhicules destinés aux longs trajets.

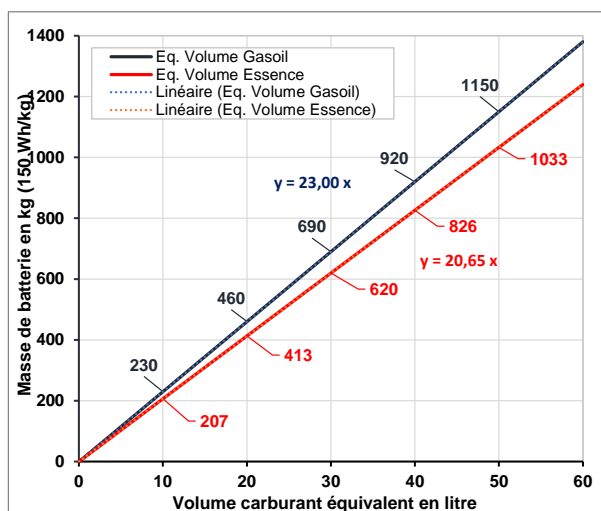


Fig. 1 – Masse de batteries nécessaires pour bénéficier des mêmes quantités d'énergie contenues dans différents volumes d'essence et de gasoil.

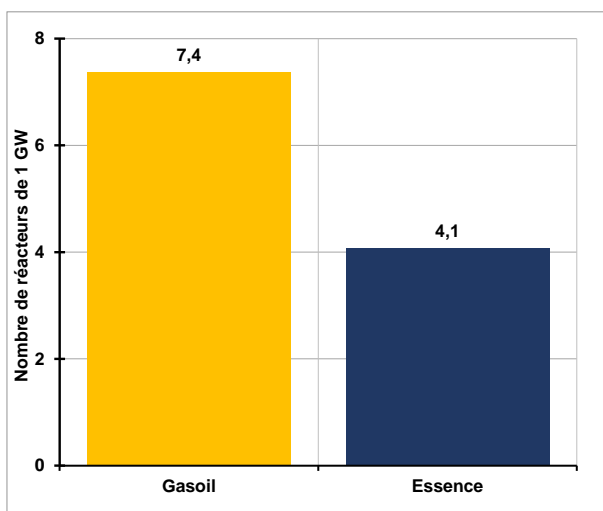


Fig. 2 – Nombre de centrales électriques de puissance 1 GW pour répondre aux besoins annuels du parc automobile français essence et gasoil (réf 2021) [7].

L'évolution du parc automobile vers plus d'électriques nécessitera cependant une adaptation de l'offre de production électrique capable de répondre aux besoins de recharge. Sur la figure 2, sont reportés les nombres de centrales électriques nécessaires pour couvrir les besoins 2021 en énergie du parc automobile national pour des rendements des véhicules thermiques et électriques, du réservoir/de la batterie à la roue respectivement égaux à 0.25 et 0.72 et un rendement sur réseau, de la centrale à la batterie, de 0.85 [5]. Les calculs s'effectuent sur la base des consommations d'essence et de gasoil de 2021, données par l'Union Routière de France [6], respectivement égales à 9.8 et 15.9 millions de m³. Pour une densité massique d'énergie de batteries conditionnées égale à 150 Wh/kg, le besoin en centrales électriques de 1 GW serait de 11 centrales⁷, 7 centrales pour couvrir les besoins des véhicules qui fonctionnaient jusqu'à présent au gasoil, 4 centrales pour couvrir les besoins des véhicules qui fonctionnaient à l'essence.

² L'énergie des batteries conditionnées est au 1^{er} janvier 2023 de l'ordre de 150 Wh/kg sachant qu'un Wh/kg est égal à 3600 J/kg. Ainsi 150 Wh/kg = 150 * 3600 J/kg = 540 000 J/kg = 0.54 MJ/kg.

³ 1606 MJ = 0.747 kg/dm³ * 50 dm³ * 43 MJ/kg et 1789 MJ = 0.832 kg/dm³ * 50 dm³ * 43 MJ/kg.

⁴ 402 MJ = 1606 MJ * 0.25 et 447 MJ = 1789 MJ * 0.25.

⁵ Masse à vide comprise entre 1214 et 1323 kg pour une Renault Mégane.

⁶ Masse à vide comprise entre 1424 et 1463 kg pour une Renault Kadjar.

⁷ Plus précisément 7.4 + 4.1 centrales, soit 11.5 centrales.

3. PROBLÉMATIQUE ET TYPOLOGIE

Les rendements de transformation en énergie mécanique de l'énergie chimique contenue dans les carburants sont faibles, de l'ordre de 25%, et les véhicules à moteurs thermiques sont utilisés dans 77% des cas pour transporter le plus souvent une seule personne sur des trajets quotidiens compris entre 5 et 15 kilomètres [7, G]. Dans les autres cas, le véhicule est utilisé pour effectuer de longs trajets, le week-end ou lors des périodes de congés. Cette stratification suggère d'utiliser jusqu'à 2035 des véhicules légers électriques pour les déplacements urbains et des véhicules hybrides ou tout électriques à forte masse embarquée de batteries lorsque le véhicule doit être utilisé quotidiennement d'une zone périurbaine à une zone urbaine et/ou occasionnellement pour effectuer de longs trajets. La solution consiste alors à adapter la masse de batteries aux besoins de déplacements ; un faible volume de batteries pour les déplacements courts, un volume de batteries maximal lorsque le véhicule doit être utilisé sur un trajet long. Une telle solution peut s'imaginer en location.

S'agissant des véhicules hybrides proposés à la vente jusqu'en 2035 au sein de la communauté européenne et lorsque les trajets en zone urbaine ne dépassent pas quelques kilomètres, le **véhicule hybride non rechargeable** peut convenir à condition de disposer sur son trajet quotidien d'une distance suffisante pour recharger la batterie et permettre une utilisation totalement électrique en zone urbaine. Lorsque le profil du parcours ne permet pas cette recharge, le **véhicule hybride rechargeable** est plus adapté. Le véhicule est alors rechargé sur le réseau la nuit et utilisé chaque jour en ville en mode électrique. Cette solution permet de réduire la pollution des villes et offre la possibilité d'utiliser le même véhicule sur de longs trajets en utilisant le moteur thermique. Dans cette version, l'utilisation de carburants de seconde génération [H] ou issus du procédé Fischer-Tropsch [8] associée à une hybridation série couplée à des moteurs roues [9, I] permettrait de supprimer l'empreinte carbone tout en améliorant l'efficacité énergétique du moteur thermique. Le véhicule est alors équipé d'un gros moteur électrique, d'un petit moteur thermique et le moteur électrique assure la rotation des roues. Le moteur thermique fonctionne alors sur son régime optimal et est utilisé pour alimenter le moteur électrique et recharger la batterie. Une architecture à 2 ou 4 moteurs roues associée à un système de récupération d'énergie au freinage permettrait de réduire les pertes d'énergie et la consommation du moteur thermique de près de 30%⁸ [9].

La solution du véhicule électrique ou hybride rechargeable n'est cependant acceptable que si l'énergie utilisée pour produire l'électricité ne résulte pas de la combustion de produits carbonés fossiles. L'électricité doit alors être d'origine hydraulique, éolienne, solaire, géothermique ou produite à partir de centrales nucléaires. L'utilisation du gaz naturel dans les centrales thermiques pour produire de l'électricité peut cependant s'envisager dans une période de transition en réduisant progressivement leur contribution. Les rendements de combustion atteignent en effet aujourd'hui des valeurs proches de 0.60 (0.30 à 0.45 pour les autres centrales thermiques) et les rendements énergétiques de la centrale à la roue, proches de 0.40 ($0.60 * 0.85$ (pertes sur le réseau) * 0.80 (au mieux pour le rendement de la batterie à la roue)), supérieurs au rendement du réservoir à la roue (0.25) pour les moteurs thermiques permettent de réduire l'empreinte carbone de la combustion et la consommation [5]. Pour un véhicule hybride série disposant d'un moteur thermique qui fonctionne en continu sur son meilleur point de fonctionnement à partir de biocarburant, le rendement du réservoir à la roue est de 0.40 (0.50 (pour la conversion du carburant en énergie électrique) * 0.80 (pour le rendement de la batterie à la roue)).

4. BASES THÉORIQUES

Les déplacements automobiles comportent des phases d'accélération, des phases effectuées à vitesse constante et des phases de décélération. Pour chacune de ces phases, sont successivement établies les puissances et les énergies dissipées par l'inertie, le roulement et l'aérodynamique.

4.1 Énergie et puissance pour atteindre la vitesse V_0 – L'énergie et la puissance nécessaires

⁸ 25% en conduite mixte et 35% en conduite urbaine. Ces réductions proviennent essentiellement de la capacité de récupération de l'énergie au freinage, 85% pour la version "moteurs roues" contre 20 à 25% pour le moteur thermique conventionnel.

pour atteindre la vitesse V_0 sont fonctions de la masse M à déplacer, des efforts aérodynamiques, du frottement et de la déformation des pneumatiques au contact de la chaussée (roulement). Les relations qui suivent sont établies en considérant un départ à vitesse nulle.

4.1.1 Énergie et puissance pour mettre en vitesse la masse M : si η désigne le rendement du système énergétique (de la batterie à la roue), l'énergie à fournir pour mettre en vitesse la masse M supposée constante lors du déplacement (vrai en toute rigueur sur un véhicule totalement électrique mais faux pour un moteur à combustion) de la vitesse nulle à la vitesse V_0 et d'une altitude nulle à une altitude Z est donnée par :

$$\Delta E_{v,g}^\eta = \frac{M}{\eta} \left[\frac{V_0^2}{2} + gZ \right]$$

Et la puissance à mettre en œuvre sur la durée Δt du trajet est :

$$\Delta W_{v,g}^\eta = \frac{M}{\eta} \left[\frac{V_0^2}{2} + gZ \right] \frac{1}{\Delta t}$$

Ces relations sont établies en supposant que les énergies nécessaires aux gains d'altitude d'amplitude ΔZ sont totalement restituées au système d'énergie embarquée lors des pertes d'altitude de même amplitude ΔZ (hypothèse fautive en toute rigueur).

Concernant l'influence des efforts aérodynamiques et de roulement, plusieurs cas sont à considérer en fonction de l'équation horaire liée à l'accélération. Dans les développements qui suivent, l'accélération est considérée constante jusqu'à l'obtention de la vitesse cible désignée V_0 . Dans ce cas et à chaque instant de date t , la vitesse et l'accélération sont liées par la relation :

$$V = \gamma t$$

4.1.2 Puissance et énergie aérodynamiques pour atteindre la vitesse V_0 : l'énergie et la puissance aérodynamiques nécessaires pour atteindre la vitesse V_0 sont fonctions de la masse volumique ρ de l'air (elle-même fonction de la température T et de la pression P), du maître couple S_{MC} et du coefficient de traînée aérodynamique C_x .

- **Puissance aérodynamique :** la puissance aérodynamique à l'instant de date t pour la vitesse $V(t)$ est donnée par la relation :

$$W_{aéro}(t) = \frac{\rho}{2} S_{MC} C_x V^3(t)$$

En choisissant d'exprimer la vitesse en fonction de l'accélération et de l'instant de date t , cette expression devient :

$$W_{aéro}(t) = \frac{\rho}{2} S_{MC} C_x \gamma^3 t^3 \quad (1)$$

- **Énergie aérodynamique :** d'après l'équation (1), l'énergie élémentaire dissipée par l'aérodynamique, entre l'instant de date initiale t_i et l'instant final de date t_f , est donnée par :

$$\begin{aligned} [\Delta E_{aéro}]_{t_i}^{t_f} &= \frac{\rho}{2} S_{MC} C_x \gamma^3 \left[\frac{t_f^4}{4} - \frac{t_i^4}{4} \right] \\ &= \frac{\rho}{2} S_{MC} C_x \left[V_f^3 \frac{t_f}{4} - V_i^3 \frac{t_i}{4} \right] \\ [\Delta E_{aéro}]_{t_i}^{t_f} &= W_{aéro}(t_f) \frac{t_f}{4} - W_{aéro}(t_i) \frac{t_i}{4} \end{aligned}$$

Si la vitesse est nulle à l'instant de date t_i (hypothèse), alors l'énergie dissipée par l'aérodynamique à l'instant de date t est plus généralement donnée par l'expression :

$$E_{aéro}(t) = W_{aéro}(t) \frac{t}{4}$$

4.1.3 Puissance et énergie de roulement pour atteindre la vitesse V_0 : l'énergie et la puissance de roulement sont fonctions de la masse M du véhicule à déplacer, de l'accélération de la pesanteur g et du coefficient de roulement C_r , généralement compris entre 0.006 et 0.012. En l'absence d'information sur ce coefficient et compte tenu de la dispersion possible, ce dernier est par la suite pris égal à 0.009.

- **Puissance dissipée par le roulement :** la puissance nécessaire pour la vitesse $V(t)$ s'exprime par la relation :

$$W_{\text{roul}}(t) = M g C_r V(t)$$

$$W_{\text{roul}}(t) = M g C_r \gamma t$$

Il est ici intéressant de remarquer que la puissance associée au roulement, et par suite l'énergie dissipée, varie linéairement en fonction du coefficient de roulement C_r . L'objectif étant alors d'accroître l'autonomie des véhicules électriques, ce seul résultat suggère de réduire la résistance au roulement via le développement de pneumatiques adaptés.

- **Énergie de roulement :** l'énergie dissipée par le roulement entre l'instant de date initiale t_i et l'instant final de date t_f , est donnée par :

$$[\Delta E_{\text{roul}}]_{t_i}^{t_f} = W_{\text{roul}}(t_f) \frac{t_f}{2} - W_{\text{roul}}(t_i) \frac{t_i}{2}$$

Si la vitesse est nulle à l'instant de date t_i , alors l'énergie dissipée par le roulement à l'instant de date t est plus généralement donnée par l'expression :

$$E_{\text{roul}}(t) = W_{\text{roul}}(t) \frac{t}{2}$$

Finalement, la puissance dissipée par l'aérodynamique et le roulement s'exprime à chaque instant par :

$$W_{\text{aéro+roul}}(t) = \left[\frac{\rho}{2} S_{MC} C_x V^3(t) + M g C_r V(t) \right]$$

Et l'énergie à fournir de l'instant de date t_i où la vitesse est nulle à l'instant de date t où la vitesse est $V(t)$ est donnée par :

$$E_{\text{aéro+roul}}(t) = \frac{\rho}{2} S_{MC} C_x V^3(t) \frac{t}{4} + M g C_r V(t) \frac{t}{2}$$

Si η_m et η_t désignent respectivement les rendements de la batterie à la sortie du moteur électrique puis du moteur électrique à la roue (rendement de transmission) tels que $\eta = \eta_m * \eta_t$, la puissance à fournir à chaque instant de date t et l'énergie à fournir de la vitesse nulle à la vitesse $V(t)$ sont respectivement données par les relations :

$$W_{\text{aéro+roul}}^\eta(t) = \frac{1}{\eta} \left[\frac{\rho}{2} S_{MC} C_x V^3(t) + M g C_r V(t) \right]$$

$$E_{\text{aéro+roul}}^\eta(t) = \frac{1}{\eta} \left[\frac{\rho}{2} S_{MC} C_x V^3(t) \frac{t}{4} + M g C_r V(t) \frac{t}{2} \right]$$

Ces relations sont utilisées pour caractériser les puissances et les énergies dissipées par l'aérodynamique et le roulement, sans et avec rendement(s), durant les phases d'accélération et de décélération à chaque instant de date t . De manière générale, les énergies s'expriment du réservoir ou de la batterie à la roue et les puissances de la sortie du moteur à la roue. Les rendements du moteur et de transmission sont alors pris en compte pour déterminer les énergies consommées tandis que le rendement de transmission est uniquement considéré pour la puissance à fournir par le moteur.

4.1.4 Estimation des accélérations : des ordres de grandeur pour les accélérations sont nécessaires pour estimer les puissances et les énergies à fournir lors des phases de mise en mouvement des véhicules. Ces ordres de grandeur peuvent s'estimer à partir d'une distance parcourue ΔL sur une durée Δt à partir de la vitesse nulle ou à partir d'une durée Δt nécessaire pour atteindre une vitesse donnée V_0 à partir de

la vitesse nulle.

- À partir d'une distance parcourue ΔL sur une durée Δt :

$$\gamma = \frac{2\Delta L}{\Delta t^2}$$

- À partir de la durée Δt nécessaire pour atteindre la vitesse donnée V_0 :

$$\gamma = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V_0}{\Delta t}$$

En pratique, les accélérations se déterminent à partir de la durée nécessaire pour parcourir 400 mètres ou pour atteindre la vitesse de 100 km/h à partir de la position arrêtée. Des ordres de grandeur pour les accélérations de véhicules des segments⁹ A, B, C et D sont reportés dans le tableau 1 ci-dessous.

Segments	Exemples de types véhicules	Masse à vide en kg	Durée 0-100 km/h en seconde (s)	Accélération en m/s ²
A	Renault TWINGO III 65 ch Essence	975	15.1	1.8
B	Renault Clio V 91 ch Essence	1082	12.2	2.3
C	Renault Mégane 1.3 Tce 140 ch Essence	1231	9.4	3.0
D	Renault Talisman 160 ch Essence	1518	9.6	2.9

Tableau 1 – Ordres de grandeur pour les accélérations [J, K] (ch pour Cheval Vapeur).

Il est important de préciser à ce niveau que les puissances mentionnées dans la seconde colonne du tableau 1 se déterminent sur un banc de puissance à plein régime à partir d'un frein pour mesurer un couple moteur (frein) et d'un relevé de la vitesse de rotation. La puissance disponible à la roue est inférieure à la puissance ainsi déterminée et fonction de la valeur du rendement de transmission η_t .

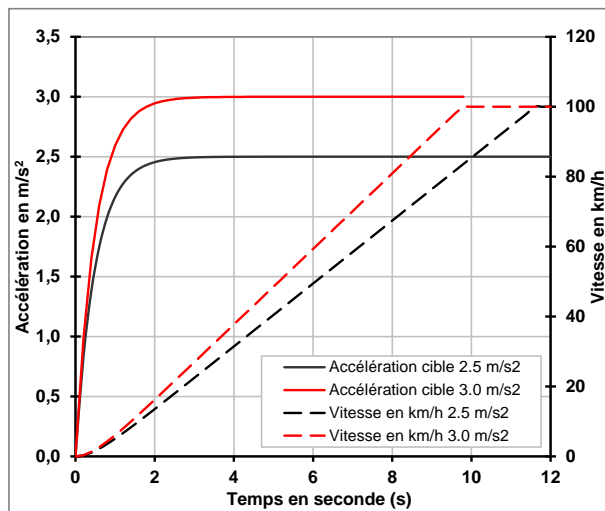


Fig. 3 – Évolutions de l'accélération et de la vitesse pour atteindre 100 km/h après 10 et 12 secondes avec $\gamma = 0$ et $V = 0$ à $t = 0$.

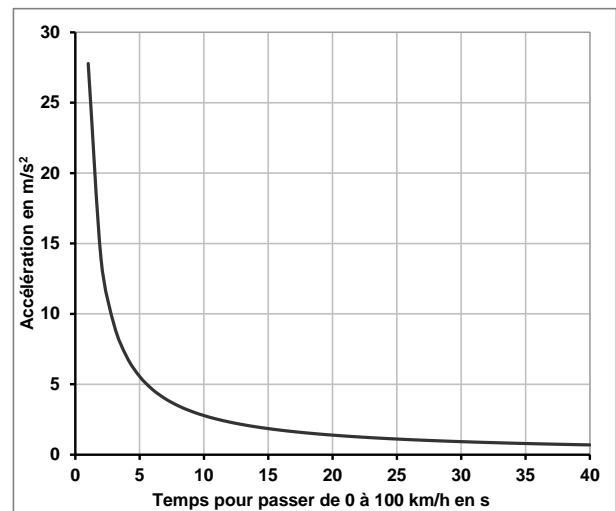


Fig. 4 – Évolution de l'accélération en fonction du temps pour atteindre la vitesse $V_0 = 100$ km/h à partir de la vitesse nulle, hypothèse $\gamma = cte \forall t$.

De manière générale, l'évolution en fonction du temps t de l'accélération $\gamma(t)$ est progressive et peut-être représentée par l'équation :

$$\gamma(t) = \gamma_0 (1 - e^{-\frac{t}{C}})$$

où γ_0 et C représentent respectivement l'accélération à atteindre et C une constante de temps. Pour des accélérations γ_0 égales à 2.5 et 3.0 m/s², les évolutions temporelles de l'accélération et de la vitesse déduites de l'équation précédente sont reportées sur la figure 3. Pour une accélération de 3.0 m/s², un peu moins de 10 secondes (exactement 9.77 secondes) sont nécessaires pour atteindre la vitesse de 100 km/h

⁹ B0, micro urbaines / A mini citadines / B citadines polyvalentes / C berlines compactes / D berlines taille S ou familiales / E berlines taille M ou routières.

à partir de la vitesse nulle. Cette valeur est cohérente avec les valeurs communément relevées lors des essais effectués sur des véhicules commerciaux, voir le tableau 1.

Pour simplifier et dans les développements qui suivent, l'accélération est considérée constante sur toute la phase de mise en vitesse. L'évolution de l'accélération (resp. du temps) en fonction du temps (resp. de l'accélération) pour atteindre la vitesse de 100 km/h est reportée sur la figure 4.

4.1.5 Ordres de grandeur pour les puissances : les puissances minimales que doivent délivrer les moteurs pour mettre en mouvement les véhicules du tableau 1, de la vitesse nulle à 100 km/h pour les accélérations du tableau 1, sont reportées dans le tableau 2. Les résultats s'obtiennent à partir des équations 4.1.1 à 4.1.4 pour un produit $S_{MC}C_x = 0.64 \text{ m}^2$ et un rendement de transmission η_t égal à 0.80.

Exemples de types véhicules ¹⁰	Masse à vide en kg + 75 kg	Durée 0-100 km/h en s Constructeur	Durée 0-100 km/h en s Par calcul	Puissance sans perte Rd $\eta=1.0$ en ch	Puissance avec Rd $\eta_t=0.8$ en ch
TWINGO III 65 ch	1050	15.1	15.4	60	74
Clio V 91 ch	1157	12.2	12.1	78	98
Mégane1.3 Tce 140 ch	1306	9.4	9.3	108	135
Talisman 160 ch	1593	9.6	9.6	126	157

Tableau 2 – Durées 0-100 km/h et puissances avec et sans rendement de transmission en ch [J, K].

Les durées d'accélération pour atteindre la vitesse de 100 km/h et les ordres de grandeur pour les puissances à mettre en œuvre sont en bon accord avec les données reportées dans le tableau 1 et valident l'approche analytique.

4.2 Puissance et énergie pour des trajets effectués à la vitesse constante V_0 – Les effets d'inertie sont nuls et le déplacement à vitesse constante nécessite de compenser à chaque instant l'énergie dissipée par l'aérodynamique et le roulement.

- **Aérodynamique :** la puissance et l'énergie à fournir par la batterie pour compenser les pertes dissipées par l'aérodynamique sur l'intervalle de temps Δt sont respectivement données par :

$$W_{\text{aéro}}^{\eta} = \frac{1}{\eta} \frac{\rho}{2} S_{MC} C_x V_0^3 \quad (2)$$

$$\Delta E_{\text{aéro}}^{\eta} = \frac{1}{\eta} \frac{\rho}{2} S_{MC} C_x V_0^3 \Delta t \quad (3)$$

- **Roulement :** la puissance et l'énergie à fournir par la batterie pour compenser les pertes de roulement, liées aux frottement et déformations des pneumatiques sur la chaussée, sont données par :

$$W_{\text{roul}}^{\eta} = \frac{1}{\eta} M g C_r V_0 \quad (4)$$

$$\Delta E_{\text{roul}}^{\eta} = \frac{1}{\eta} M g C_r V_0 \Delta t \quad (5)$$

Si ΔL désigne la distance parcourue à la vitesse constante V_0 sur la durée Δt , les énergies dissipées par l'aérodynamique et le roulement, données par les équations (3) et (5), peuvent également s'exprimer sous la forme :

$$\Delta E_{\text{aéro}}^{\eta} = \frac{1}{\eta} \frac{\rho}{2} S_{MC} C_x V_0^2 \Delta L$$

$$\Delta E_{\text{roul}}^{\eta} = \frac{1}{\eta} M g C_r \Delta L$$

Les énergies dissipées par l'aérodynamique et le roulement varient ainsi linéairement en fonction de la distance parcourue.

- **Variation d'altitude :** l'énergie et la puissance nécessaires pour accroître l'altitude d'une hauteur ΔZ d'un parcours effectué à la vitesse constante V_0 sont données par :

$$\Delta E_g^{\eta} = \frac{1}{\eta} M g \Delta Z$$

$$\Delta W_g^{\eta} = \frac{1}{\eta} M g \frac{\Delta Z}{\Delta t}$$

- **Ordres de grandeur :** les ordres de grandeur pour les puissances dissipées par l'aérodynamique et le

¹⁰ Rappel : la puissance des moteurs se détermine sur un banc de puissance à partir du plein régime et de la mesure du couple moteur (frein) et du relevé de la vitesse de rotation(compte-tours).

roulement associés au déplacement à la vitesse constante $V_0=130$ km/h d'un véhicule de masse $M=1200$ kg (type Clio à vide avec 1 conducteur de 75 kg et bagages), de produit $S_{MC} C_x$ égal à 0.64 m² pour les coefficients de roulement $C_r=0.006, 0.009$ et 0.012 sont reportées dans le tableau 3.

M=1200 kg	Aérodynamique	Roulement	Aérodynamique + roulement	Roulement en %
$C_r = 0.006$	18534	2550.6	21085	12
$C_r = 0.009$	18534	3825.9	22360	17
$C_r = 0.012$	18534	5101.2	23636	22

Tableau 3 – Ordres de grandeur sans perte ($\eta=1$) pour les puissances à vitesse V_0 constante en Watt (W).

La contribution du roulement peut ainsi représenter 12 à 22% de la puissance totale pour une masse $M=1200$ kg. Ce seul résultat suggère de rechercher des solutions pour réduire la résistance au roulement¹¹ et, plus simplement, de surveiller régulièrement la pression des pneumatiques pour éviter leur déformation sous la charge et par suite leur échauffement.

4.3 Énergie de récupération - Pour un véhicule de masse M qui se déplace à la vitesse V , constante ou transitoire, et un rendement de récupération η_r , l'énergie de récupération se déduit directement de l'énergie cinétique et est donnée par :

$$\Delta E_r^\eta = \eta_r \frac{MV^2}{2}$$

La récupération d'énergie s'effectue dès le levier de pied ou lorsque le pied commence à appuyer sur la pédale frein pour ne pas perdre l'avantage de la réduction de consommation liée à la roue libre. Tous les véhicules électriques possèdent un système de récupération d'énergie pour accroître le rendement global de la batterie à la roue qui peut atteindre 0.90 en circuit urbain.

5. AUTONOMIE DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES EN 2023

L'analyse s'effectue sur la base des résultats proposés par Bertrand Bellois pour l'Argus et mis à jour le 10 octobre 2022 [L], annexe 1. Ces résultats s'appuient sur les consommations d'énergies électriques relevées sur deux mêmes trajets routier et autoroutier, entre Croissy-Beaubourg (77) et l'aire d'autoroute de Vrigny (51), effectués à des dates différentes et rapportées en kWh sur 100 kilomètres. Ces trajets s'effectuant en conditions réelles de circulation, la reproductibilité des conditions n'est pas parfaite mais permet d'obtenir des ordres de grandeur et d'effectuer des comparaisons.

	Prix achat véhicule en k€	Énergie embarquée en kWh	Masse à vide en kg	Masse de batteries en kg	Prix achat €/kg de batteries	Autonomie route en km	Autonomie autoroute en km
Moyenne	48	64	1801	429	113	388	260
Médiane	44	64	1760	427	108	384	261
Écart type	20	19	334	129	24	120	83
Mini	16	27	970	183	58	173	112
Maxi	136	108	2510	719	189	667	495

Tableau 4 – Caractéristiques principales issues de l'échantillon ARGUS [L]. Les prix d'achat sont issus des données constructeurs ou relevés sur le site <https://www.caradisiac.com/> [J].

Connaissant alors les consommations sur chacun des trajets, l'autonomie se détermine à partir du pourcentage des énergies électriques consommées. Les trajets s'effectuent avec une seule personne à bord par des températures extérieures comprises entre 10 et 30°C, des vitesses de vent toujours comprises entre 0 et 20 km/h et des températures d'habitacle constantes respectivement égales à 20 et 23 °C par temps froid et chaud. Le trajet routier de 140 km s'effectue aux vitesses de 50, 70, 80 et 110 km/h et la vitesse sur autoroute est maintenue à 130 km/h sur 109 km. L'objectif de cet article étant d'effectuer une

¹¹ Pneumatique Energy Saver produit par Michelin dès 2008.

analyse globale de l'existant, les marques et les désignations des véhicules, reportées en annexe 1, ne sont que rarement mentionnées.

La densité massique d'énergie des batteries conditionnées considérées dans cet article s'identifie au quotient de l'énergie maximale pouvant être stockée dans la batterie Li-ion de la Renault Mégane E-Tech 100% électrique par la masse déclarée de batteries embarquées. Pour ce véhicule, 60 kWh sont stockés dans 395 kg de batteries conditionnées¹² [10] et la densité massique d'énergie électrique s'élève à 150 Wh/kg. Cette valeur est alors utilisée pour estimer les énergies contenues dans les batteries des véhicules analysés à partir des énergies consommées sur les trajets routier et autoroutier.

Les caractéristiques principales de la distribution (valeurs moyennes, médianes, écarts types, valeurs mini et maxi) sont reportées dans le tableau 4. Quelles que soient les grandeurs analysées (en tête des colonnes des tableaux 4 et 6), les valeurs médianes, proches des valeurs moyennes, montrent qu'existent pratiquement autant de valeurs au-dessus qu'au-dessous des valeurs moyennes. Ce résultat atteste à lui seul de la pertinence de l'échantillon retenu par Bertrand Bellois pour l'Argus. Le prix d'achat moyen se situe autour de 48 k€ pour une énergie embarquée de 64 kWh qui permet d'effectuer respectivement 388 et 260 kilomètres sur route et autoroute pour des valeurs médianes et des écarts types respectivement égaux à 384 et 261 km et 120 et 83 km. Ces deux dernières valeurs montrent que la dispersion autour de la moyenne est plus importante sur le trajet routier que sur le trajet autoroutier. Ce dernier résultat est cohérent avec les difficultés de circulation (véhicules lents, difficultés de dépasser, feux rouges...) qui peuvent se rencontrer sur la route. Le trajet effectué à vitesse stabilisée sur autoroute à la vitesse $V_0=130$ km/h permet d'estimer la durée Δt des parcours de longueur L puis, connaissant la quantité ΔE_c^η d'énergie consommée à la batterie, d'accéder à la puissance moyenne W_c^η nécessaire au maintien de la vitesse, soit :

$$W_c^\eta = \frac{\Delta E_c^\eta}{\Delta t} = \frac{\Delta E_c^\eta}{\Delta L} V_0$$

L'énergie ΔE_c^η consommée au niveau de la batterie est utilisée pour maintenir la vitesse constante mais également pour palier aux pertes d'énergie de la batterie à la sortie du moteur électrique et de la sortie du moteur électrique aux roues. Si η_m et η_t désignent respectivement les rendements de la batterie à la sortie du moteur électrique puis du moteur à la roue (rendement de transmission), la puissance réelle à fournir pour vaincre le seul travail des efforts aérodynamiques et de roulement par unité de temps est alors donnée par :

$$W_{aéro+roul} = W_c^\eta \eta_m \eta_t = W_{aéro+roul}^\eta \eta_m \eta_t \quad (6)$$

Dans les développements qui suivent les rendements du moteur électrique η_m et de la transmission η_t sont respectivement pris égaux à 0.90 et 0.80 et le rendement de la batterie à la roue, noté η , égal au produit $\eta_m * \eta_t$, est égal à 0.72.

En choisissant d'exprimer la puissance dissipée par l'aérodynamique comme une fraction de la puissance totale nécessaire au mouvement à partir d'un coefficient μ fonction du coefficient de roulement C_r , alors :

$$W_{aéro} = W_{aéro+roul} - M g C_r V_0 = \mu W_{aéro+roul}$$

et les produits des maîtres couples S_{MC} par les coefficients de traînée aérodynamique C_x de chacun des véhicules peuvent s'estimer par :

$$S_{MC} C_x = \frac{2 \mu W_{aéro+roul}}{\rho V_0^3} \quad (7)$$

En pratique, le coefficient μ se détermine à partir des puissances aérodynamique et de roulement définies au paragraphe 4.2. Les calculs s'effectuent pour un véhicule de masse $M=1800$ kg conduit par une personne de 75 kg qui transporte 25 kg de bagages à la vitesse de 130 km/h pour différentes valeurs du coefficient de roulement C_r , voir le tableau 5. Pour la valeur moyenne $C_r=0.009$ choisie comme référence,

¹² Densité massique d'énergie pour la batterie de la Renault Mégane E-Tech 60 kWh * 1000 Wh/kWh / 395 kg = 152 Wh/kg.

les pertes d'énergie associées au roulement représentent 25% des pertes aérodynamique et de roulement et le coefficient μ est égal à 0.75.

M=1900 kg	Aérodynamique	Roulement	Aérodynamique + roulement	Roulement en %
$C_r = 0.006$	18534	4038	22573	18
$C_r = 0.009$	18459	6058	24517	25
$C_r = 0.012$	18534	8077	26611	30

Tableau 5 – Ordres de grandeur sans perte ($\eta=1$) pour les puissances à vitesse V_o constante en Watt (W).

Les valeurs caractéristiques des produits des maîtres couples S_{MC} par les coefficients aérodynamiques de traînée C_x se déterminent alors à partir de l'équation (7). Ces valeurs sont reportées dans la colonne de droite du tableau 6.

	Énergie 100 km autoroute en kWh	Énergie 100 km route en kWh	Ratio Energie route / autoroute	Puissance avec pertes autoroute 130 km/h en kW	Puissance# aéro + roult autoroute 130 km/h en kW	Produits $S_{MC} C_x$ en m ²
Moyenne	24.8	16.4	1.52	32.3	23.2	0.64
Médiane	24.3	16.0	1.53	31.5	22.7	0.63
Écart type	3.3	2.4	0.13	4.3	3.1	0.09
Mini	19.3	11.5	1.32	25.1	18.1	0.50
Maxi	32.4	21.8	1.83	42.1	30.3	0.84

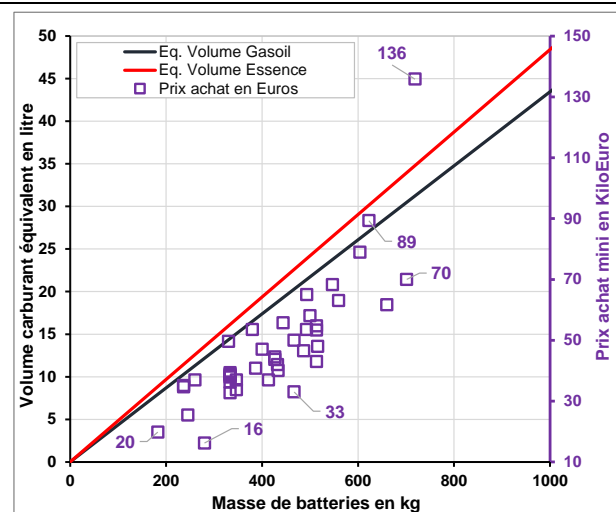
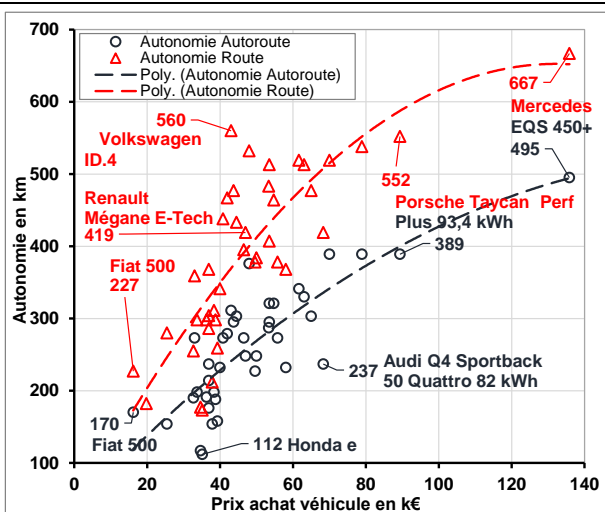
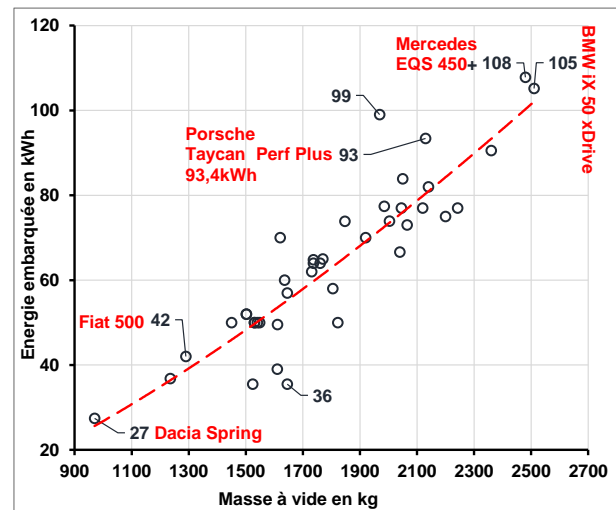
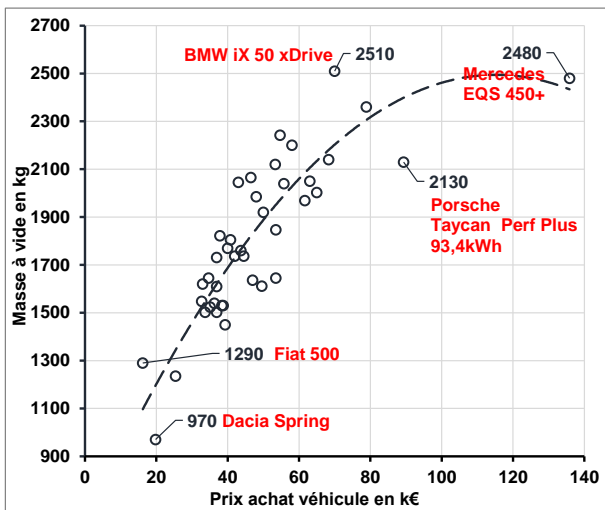
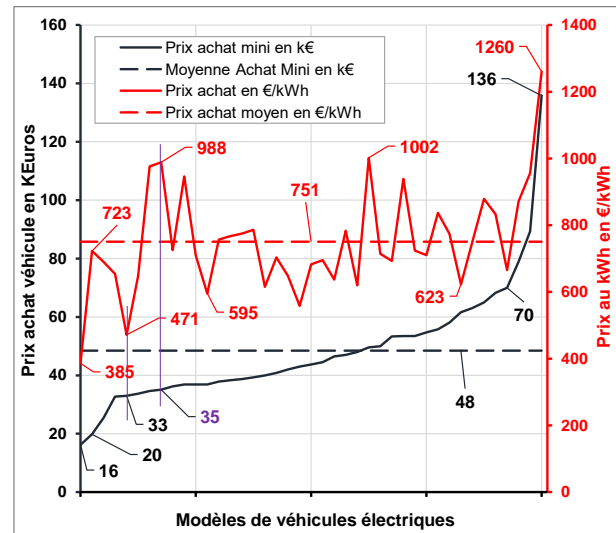
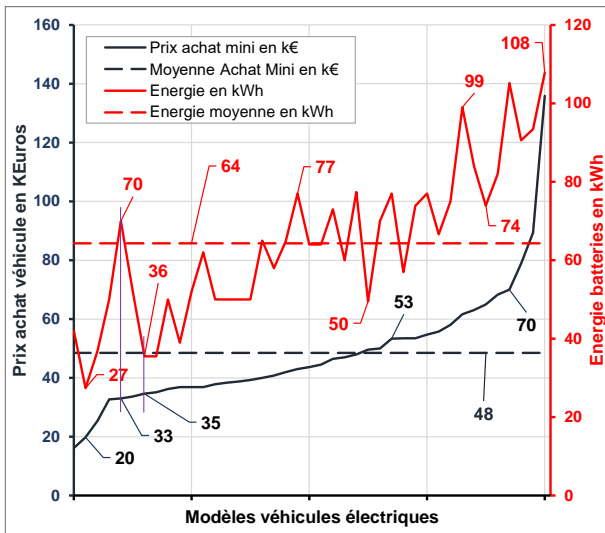
Tableau 6 – Caractéristiques principales issues de l'échantillon ARGUS [L], (# sans perte).

Toutes ces grandeurs sont conditionnées par la précision des mesures des énergies consommées et des vitesses. La précision des énergies consommées est fonction de l'instrument de mesure et la précision de la vitesse est fonction des conditions réelles de circulation. En désignant respectivement par $\Delta E_c^{\eta*}$, ΔV_o^* , $\Delta \mu^*$, $\Delta \eta_m^*$ et $\Delta \eta_t^*$, les erreurs absolues sur les relevés des énergies consommées ΔE_c^{η} , la vitesse de déplacement V_o , le ratio des puissances aérodynamique et totale, le rendement de la batterie à la sortie du moteur η_m et le rendement de transmission (du moteur à la roue) η_t , les incertitudes relatives sur les puissances W_c^{η} et les produits SC_x , déterminées à partir des dérivées logarithmiques des expressions précédentes (6) et (7), sont données par :

$$\frac{\Delta W_c^{\eta*}}{W_c^{\eta}} = \frac{\Delta E_c^{\eta*}}{E_c^{\eta}} + \frac{\Delta V_o^*}{V_o} \qquad \frac{\Delta SC_x^*}{SC_x} = \frac{\Delta \mu^*}{\mu} + \frac{\Delta W_c^{\eta*}}{W_c^{\eta}} + \frac{\Delta \eta_m^*}{\eta_m} + \frac{\Delta \eta_t^*}{\eta_t} + 3 \frac{\Delta V_o^*}{V_o}$$

Pour une erreur de lecture sur l'énergie consommée estimée à 0.5 kWh, des erreurs sur les valeurs de μ , de η_m et de η_t respectivement de l'ordre de 0.05, 0.02 et 0.05, une variation de vitesse de l'ordre de 5 km/h sur le trajet autoroutier, une puissance moyenne de 32.3 kW (tableau 6), les erreurs absolues faites sur les puissances et les produits $S_{MC} C_x$ sont respectivement égales à 1.894 kW et 0.21 m². L'incertitude sur les produits $S_{MC} C_x$ reflète la dispersion relevée sur l'analyse statistique reportée tableau 6 sans cependant prendre en compte les variations de traînée aérodynamique liées aux évolutions transitoires du champ pariétal de pression des véhicules lorsque ceux-ci sont dépassants ou dépassés [11].

Sur la figure 5 sont représentées les évolutions des prix d'achat des véhicules et des énergies embarquées en fonction des modèles classés par ordre croissant de prix. Des variations importantes apparaissent sur les énergies embarquées pour de faibles variations de prix, 34 kWh (70 kWh - 36 kWh) pour un écart de prix 2 k€ (35 k€ - 33 k€). Ces écarts mis en évidence à partir du prix au kWh embarqué apparaissent clairement sur la figure 6 (517€/kWh pour 2 k€). Les relevés de points de la figure 7 montrent que la masse à vide, conditionnée par le volume embarqué de batteries, varie suivant une loi polynômiale de type balistique en fonction du prix d'achat et quasi linéairement à l'exception des modèles haut de gamme comme la Mercedes EQS 480+ et la Porsche Taycan, cette quasi-linéarité apparait clairement sur la figure 8. Les autonomies sur route et autoroute en fonction du prix d'achat reportées sur la figure 9 confirment une nouvelle fois la quasi-linéarité avec le prix d'achat à l'exception des véhicules haut de gamme. L'énergie consommée par unité de temps étant fonction du cube de la vitesse, et même si les phases de



démarrage et d'accélération peuvent être plus importantes sur les trajets routiers que sur les trajets

autoroutiers, les autonomies restent toujours plus importantes sur route que sur autoroute. Ce résultat est en partie lié à l'efficacité des systèmes de récupération d'énergie installés sur la plupart des véhicules.

La figure 10 reprend enfin les résultats de la figure 1 sur laquelle est projeté le nuage de points des prix en fonction de la masse de batteries. Aucun véhicule électrique ne dispose aujourd'hui d'un plein d'énergie embarquée comparable à 50 litres de gasoil. Le véhicule qui offre les plus grandes autonomies, soient 667 et 495 km sur route et autoroute, est la Mercedes EQS 480+ vendue autour de 136 k€ [L], figure 10.

Dans les développements qui suivent, les énergies et les puissances nécessaires pour mettre en mouvement puis maintenir à vitesse constante un véhicule électrique sont déterminées à partir des équations rappelées au paragraphe 4. Les calculs s'effectuent pour les valeurs moyennes des masses et des produits $S_{MC}C_x$ des tableaux 4 et 6 auxquelles est associé le coefficient de roulement $C_r=0.009$. Ces résultats sont utilisés pour estimer les énergies et les masses de batteries nécessaires pour parcourir des distances habituellement accessibles aux véhicules à moteurs thermiques puis comparés aux valeurs moyennes des tableaux 4 et 6.

6. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les équations du paragraphe 4 sont utilisées pour quantifier les puissances et les énergies associées aux déplacements d'un véhicule électrique pour un rendement $\eta = \eta_m \eta_t$ (rendement de la batterie à la roue) égal à 0.72 avec $\eta_m=0.90$ et $\eta_t=0.80$. Les résultats s'obtiennent pour un véhicule de référence défini à partir des valeurs moyennes reportées dans les tableaux 4 et 6. La masse totale du véhicule est prise égale à 1900 kg (1800 kg à vide¹³ + 1 passager de 75 kg + 25 kg de bagages), le produit du maître couple par le coefficient de traînée aérodynamique $S_{MC} C_x$ s'élève à 0.64 m², le coefficient de roulement et la densité massique d'énergie valent respectivement 0.009 et 150 Wh/kg.

6.1 Puissance et énergie à fournir pour la mise en mouvement – Les énergies et les puissances nécessaires à la mise en mouvement du véhicule en faisant varier l'accélération à masse constante et la masse à accélération constante sont reportées figures 11 à 14.

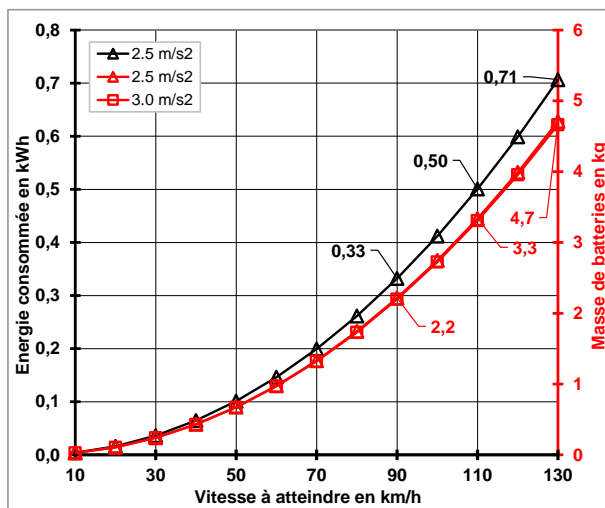


Fig. 11 – Énergies totales (vitesse, aérodynamique et roulement) nécessaires pour atteindre la vitesse V depuis l'arrêt en kWh (ord. de gauche) et masses de batteries en kg (ord. de droite), masse M=1900 kg.

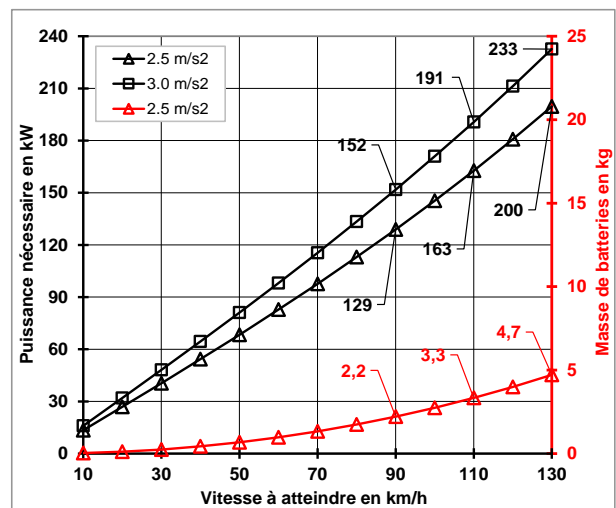


Fig. 12 – Puissances (mise en vitesse, aérodynamique et roulement) nécessaires pour atteindre la vitesse V depuis l'arrêt en kW (ord. de gauche) et masses de batteries en kg (ord. de droite), masse M=1900 kg.

6.1.1 Influences de l'accélération : pour le véhicule considéré et une accélération de 2.5 m/s², les énergies consommées à la batterie et les puissances correspondantes, énergies par unité de temps que doivent fournir les batteries, pour faire varier la vitesse de 0 à 130 km/h, sont respectivement égales à

¹³ La masse moyenne de l'échantillon égale à 1801 kg (tableau 4, 2e ligne et 4e colonne) est prise égale à 1800 kg.

0.71 kWh (figure 11) et 200 kW (figure 12). Pour un véhicule électrique de masse identique accélérant à 3.0 m/s^2 , ces valeurs deviennent respectivement égales à 0.70 kWh et 233 kW (figures 13 et 12). Quant aux contributions aérodynamiques pour l'énergie et la puissance, leurs valeurs varient respectivement de 3.7 (figure 13) et 12.9% (figure 14) à 3.1 (figure 13) et 11.1% lorsque l'accélération augmente de 2.5 à 3.0 m/s^2 . De manière générale, la contribution de l'aérodynamique dans les puissances à mettre en œuvre et les énergies dissipées diminuent avec l'augmentation de l'accélération, figure 13.

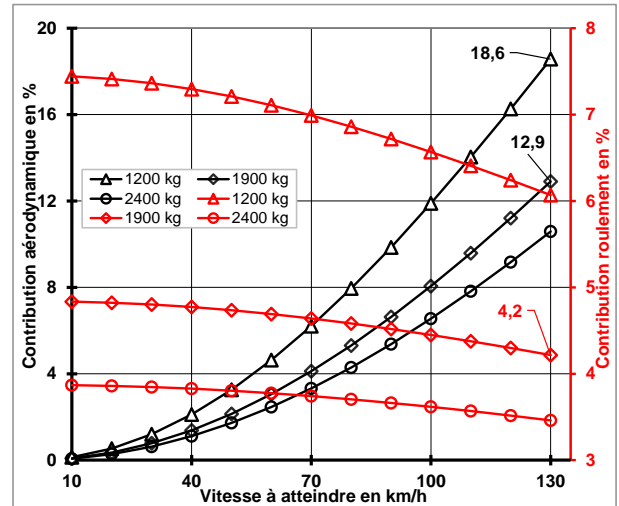
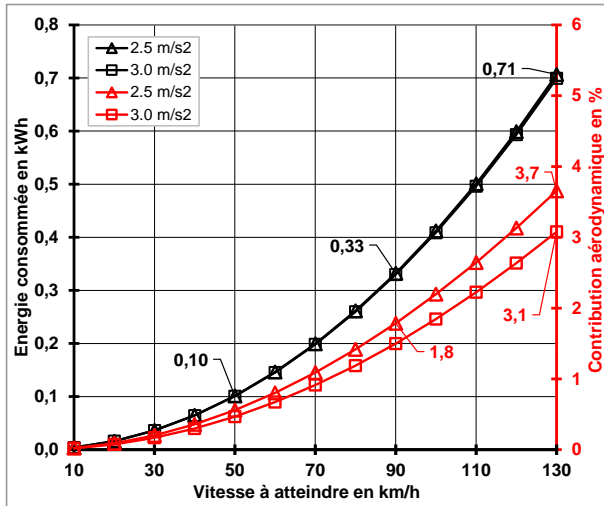


Fig. 13 – Énergies totales (vitesse, aérodynamique, roulement) nécessaires pour atteindre la vitesse V depuis l'arrêt en kWh (ord. de gauche) et contributions aérodynamiques en pourcentage (ord. de droite) pour différentes accélérations : $M=1900 \text{ kg}$.

Fig. 14 – Contributions aérodynamiques (ord. de gauche) et de roulement (ord. de droite) en pourcentages de la puissance totale (mise en vitesse, aérodynamique et roulement) pour différentes masses de véhicule : accélération = 2.5 m/s^2 .

Concernant la masse de batteries, 4.7 kg de batteries sont nécessaires pour mettre en mouvement le véhicule de la vitesse nulle à 130 km/h. Cette masse varie peu en fonction de l'accélération mais diminue avec l'augmentation de l'accélération (4.7 kg pour 2.5 m/s^2 (figure 11) et 4.6 kg pour 4.0 m/s^2). Sont enfin reportées, dans le tableau 7, les puissances que doivent délivrer les batteries sans perte (rendement $\eta = \eta_m * \eta_t = 1$) et avec pertes (rendements différents de 1) pour différentes valeurs de l'accélération. Les résultats montrent la relation forte qui existe entre l'accélération et la puissance, la puissance et la masse à mettre en mouvement (comparaison avec les tableaux 1 et 2 pour $\gamma = 2.3 \text{ m/s}^2$) ainsi que l'inutilité de disposer d'une puissance importante pour rouler à vitesse constante.

	Accélération en m/s^2	Puissance sans perte en kW ($\eta=1$)	Puissance sans perte en ch ($\eta=1$)	Puissance avec $\eta_t=0.8$ en ch ($\eta_m=1.0$)	Puissance avec $\eta_m=0.9$ et $\eta_t=0.8$ en ch
De 0 à 100 km/h	0.5	31.4	43	53	59
	1.0	49.7	68	85	94
	1.5	68.1	93	116	129
	2.3	97.4	132	166	184
	2.5	104.7	142	178	198
V=100 km/h	0.0	11.5	16	20	22

Tableau 7 – Puissances sans et avec pertes en kW ou en ch pour la masse $M=1900 \text{ kg}$ avec $\eta=1$ (sans perte), η_m le rendement de la batterie à la sortie du moteur et η_t le rendement de la sortie du moteur à la roue.

Coef roulement C_r Vitesse 130 km/h	Énergie TOTALE (Vitesse + Aéro + Roul) kWh avec Rd	Écarts en %
0.006	0.7009	
0.009	0.7065	0.803
0.012	0.7121	0.796

Tableau 8 – Évolutions en fonction du coefficient de roulement C_r , $\eta = \eta_m * \eta_t = 0.72$.

6.1.2 Influences de la masse : la contribution aérodynamique restant faible (3.7%, figure 13), l'énergie nécessaire au mouvement double pratiquement avec la masse, 3.1 et 5.9 kWh pour 1200 et 2400 kg. De manière générale, l'énergie et la puissance restent principalement pilotées par la masse (figures 15 et 16).

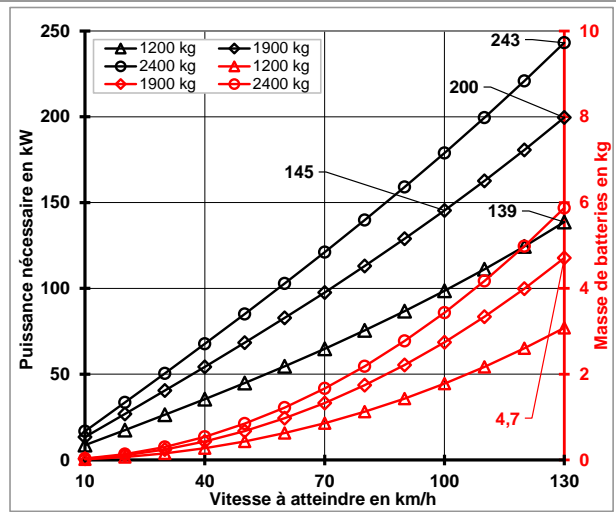
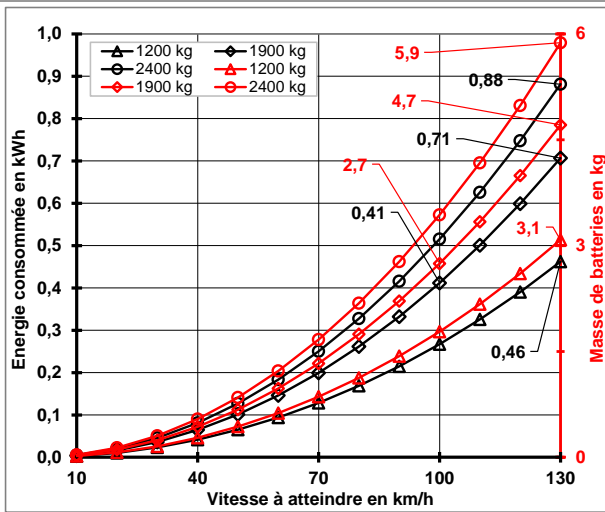


Fig. 15 – Énergies totales (mise en vitesse, aérodynamique et roulement) nécessaires pour atteindre la vitesse V depuis l'arrêt en kWh (ordonnée de gauche) et masses de batteries en kg (ordonnée de droite). Accélération = 2.5 m/s^2 .

Fig. 16 – Puissances (mise en vitesse, aérodynamique et roulement) nécessaires pour atteindre la vitesse V depuis l'arrêt en kW (ordonnée de gauche) et masses de batteries en kg (ordonnée de droite). Accélération = 2.5 m/s^2 .

Évolutions en fonction de la vitesse à atteindre depuis l'arrêt pour différentes masses de véhicule en kg.

6.1.3 Influences du coefficient de roulement : les résultats reportés dans le tableau 8 pour différentes valeurs du coefficient de roulement C_r montrent que ce coefficient reste sans influence notable sur les énergies de mise en vitesse, à peine 1.6% d'augmentation entre $C_r=0.006$ et $C_r=0.012$.

6.2 Énergies et puissances à fournir à vitesse constante - Les énergies dissipées par l'aérodynamique et/ou le roulement sur différents parcours (10, 40 et 100 kms) en fonction de la vitesse constante de déplacement sont reportées sur les figures 17 et 18.

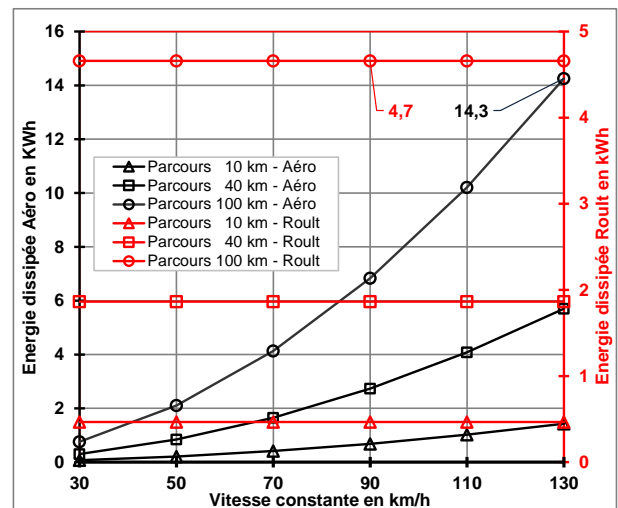
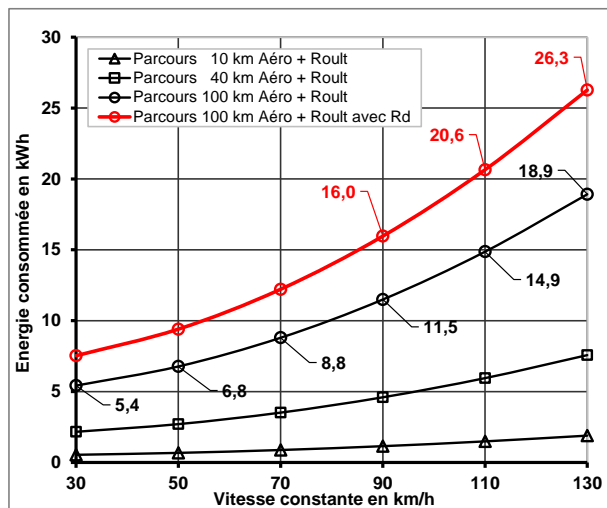


Fig. 17 – Énergies dissipées par l'aérodynamique et le roulement en kWh pour différents parcours à différentes vitesses. En rouge, l'évolution de l'énergie consommée au niveau de la batterie (rendement 0.72).

Fig. 18 – Parts des énergies dissipées par l'aérodynamique (ord. de gauche) et le roulement (ord. de droite) en kWh sur les parcours 10, 40 et 100 kms en fonction de la vitesse V_0 (rendement $\eta = 1.00$).

Évolutions pour des vitesses de déplacement V_0 constantes sur les trajets considérées (pas de mise en vitesse).

Parcourir 100 kilomètres à la vitesse de 130 km/h s'accompagne de la consommation de 26.3 kWh dont

14.3 kWh pour l'aérodynamique et 4.7 kWh pour le roulement (18.9 kW aux arrondis près) hors pertes de rendement. L'énergie de roulement, donnée par l'équation (5) et constante quelle que soit la vitesse, diminue avec la distance parcourue et représente 33% de l'énergie dissipée par l'aérodynamique à 130 km/h, voir figure 18.

L'énergie consommée à 130 km/h à la batterie par l'aérodynamique et le roulement égal à 26.3 kWh intègre le rendement global du moteur et de la transmission. Cette valeur est à comparer aux 24.8 kWh du tableau 6 issues des relevés expérimentaux [L]. L'écart de 1.5 kWh, supérieur à l'erreur absolue estimée de 0.5 kWh, reste néanmoins inférieur à l'écart type de 3.3 kWh (tableau 6, 4e ligne, 2e colonne) et valide la cohérence des hypothèses retenues.

6.2.1 Influences du coefficient de roulement C_r : les évolutions sont déterminées pour des coefficients de roulement $C_r=0.006$, 0.009 et 0.012, voir les figures 19 et 20. À 130 km/h, les énergies consommées au niveau de la batterie évoluent entre 24.1 et 28.4 kWh de part et d'autre de la valeur précédente égale à 26.3 kWh et relevée pour le coefficient de roulement $C_r=0.009$ (figure 19). L'énergie dissipée varie de 8.4 et 8.0% de part et d'autre de cette valeur. Les différences d'énergies consommées à la batterie entre les valeurs obtenues pour le coefficient $C_r=0.009$ et les énergies consommées pour les coefficients de roulement $C_r=0.006$ et $C_r=0.012$ respectivement égales à 2.2 kWh et 2.1 kWh restent dans la fourchette de l'écart type (3.3 kWh).

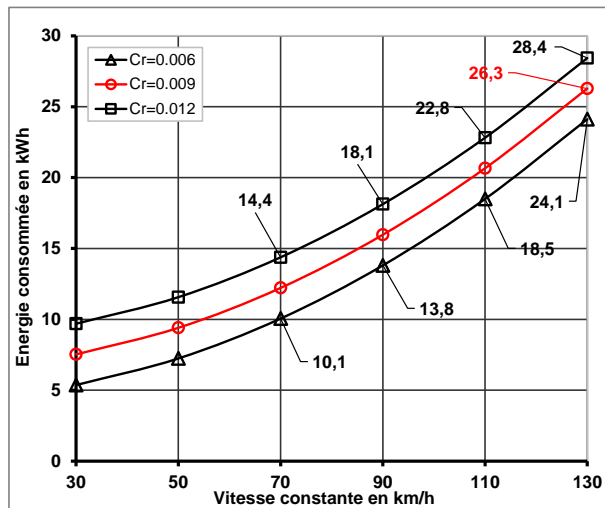


Fig. 19 – Énergies dissipées par l'aérodynamique et le roulement en kWh avec pertes en fonction du coefficient de roulement C_r . $\eta = \eta_m * \eta_t = 0.72$.

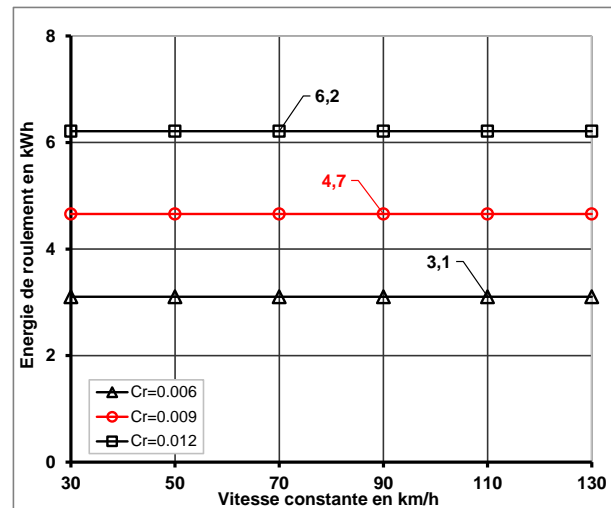


Fig. 20 – Énergies dissipées par le roulement en kWh avec pertes en fonction du coefficient de roulement C_r . Rendement $\eta = \eta_m * \eta_t = 0.72$.

Évolutions pour des vitesses de déplacement constante sur les trajets considérées (pas de mise en vitesse).

6.2.2 Influences de l'aérodynamique : les évolutions sont déterminées pour quatre valeurs du coefficient de traînée aérodynamique respectivement égales à 100, 90, 80 et 70% du coefficient de référence C_x . Les résultats montrent qu'une réduction de 30% du coefficient de traînée aérodynamique permet de diminuer de 23% la puissance totale nécessaire pour maintenir une vitesse constante de 130 km/h, figure 21 (ordonnée de droite). L'importance de l'aérodynamique est ensuite analysée en fonction de sa capacité à accroître l'autonomie. L'autonomie du véhicule augmente de 23% à 130 km/h lorsque le coefficient de traînée diminue de 30% (voir figure 22, ordonnée de gauche) et cette augmentation peut être utilisée pour réduire la masse embarquée de batteries. En pratique pour un véhicule de coefficient de traînée aérodynamique moyen égal à 0.30, réduire de 30% la traînée aérodynamique nécessite de ramener la valeur de ce coefficient à 0.20 ; une valeur plus facile à obtenir sur des véhicules uniquement électriques et proche des meilleurs coefficients de traînée aérodynamiques relevés sur la BMW 520D ($C_x=0.22$) ou l'Audi A4 ($C_x=0.23$), toutes deux à moteurs thermiques.

Sur l'ordonnée de droite de la figure 22, est enfin représentée l'évolution de la masse de batteries à embarquer pour parcourir 100 kms en fonction de la vitesse supposée constante sur le trajet. Si 50 kg de batteries sont nécessaires pour parcourir cette distance à la vitesse de 50 km/h, 175 kg deviennent

nécessaires pour parcourir la même distance à la vitesse de 130 km/h.

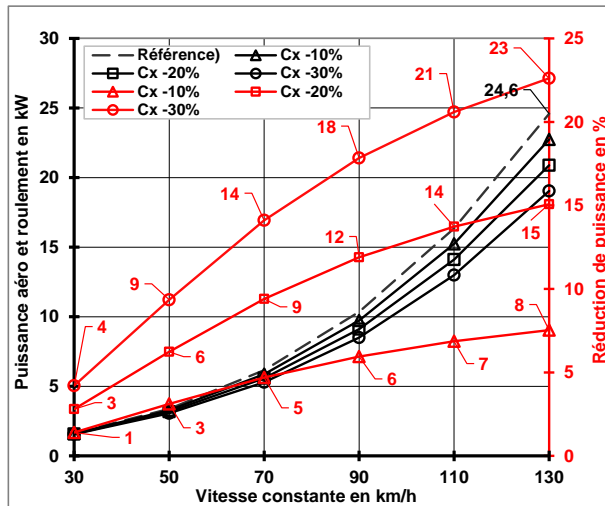


Fig. 21 – Puissances (ord. de gauche) en kW et réductions de puissance (ord. de droite) en % pour l'aérodynamique et le roulement pour maintenir une vitesse constante. $SC_x = 0.64 \text{ m}^2$ et $\eta = 1$.

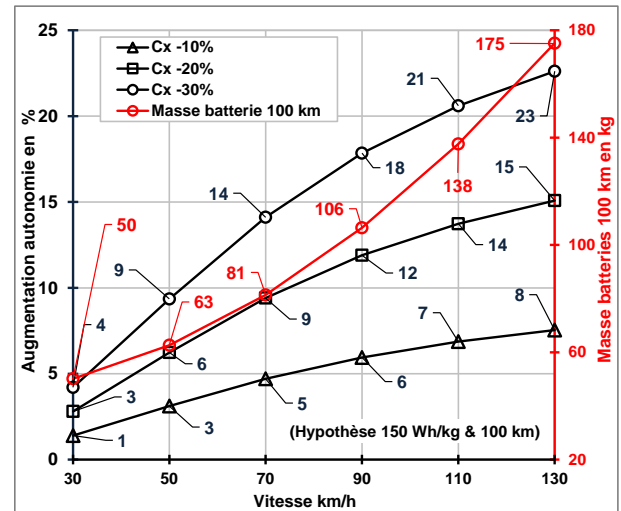


Fig. 22 – Accroissements des autonomies en km (ord. de gauche) et masses de batteries en kg pour 100 km (ord. de droite) en fonction de la vitesse pour différentes réductions du coefficient C_x . $\eta = 0.72$.

Masse roulante du véhicule $M=1900 \text{ kg}$, produit $SC_x = 0.64 \text{ m}^2$ et coefficient de roulement $C_r = 0.009$.

6.2.3 Influences de l'altitude : l'objectif consiste ici à identifier la masse maximale de véhicule qu'il est possible d'élever de 1000 m et les gains d'altitude qu'il est possible de réaliser à partir d'un véhicule de masse $M=1900 \text{ kg}$ en fonction de l'énergie disponible dans la batterie. Ces résultats sont respectivement reportés sur les ordonnées gauche et droite de la figure 23. Une énergie embarquée de 8 kWh est nécessaire pour élever de 1000 m un véhicule de masse $M=2114 \text{ kg}$, 8 kWh et 7.2 kWh sont nécessaires pour respectivement élever de 1113 et 1000 mètres un véhicule de masse $M=1900 \text{ kg}$. Ces énergies représentent près du huitième de l'énergie disponible d'un ensemble de 400 kg de batteries (60 kWh, 150 Wh/kg). Ces valeurs sont, comme précédemment, données à titre indicatif pour des pertes aérodynamiques, de roulement, d'inertie et de rendement qui ne sont ici pas prises en compte.

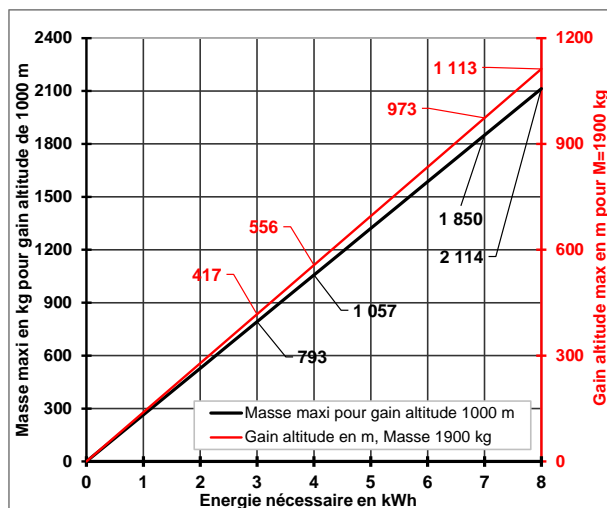


Fig. 23 – Évolution de la masse maximale pouvant être élevée de 1000 m en fonction de l'énergie consommée en kWh, ordonnée de gauche. À droite, gain d'altitude en m en fonction de l'énergie consommée en kWh.

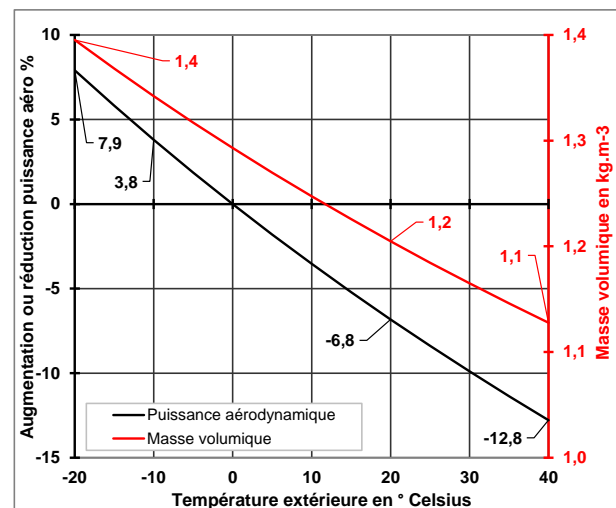


Fig. 24 – Évolutions en % de la puissance aérodynamique (ordonnée de gauche) et de la masse volumique de l'air (ordonnée de droite) en fonction de la température extérieure entre -20°C et $+40^\circ\text{C}$, (C pour Celsius).

Masse roulante du véhicule $M=1900 \text{ kg}$, produit $SC_x = 0.64 \text{ m}^2$ et coefficient de roulement $C_r = 0.009$.

Sur la base de ces résultats, l'énergie nécessaire pour accéder à l'Alpe d'Huez (1815m) à partir de Bourg-

d'Oisans (720m) est égale à 7.87 kWh¹⁴. En admettant que le trajet de 13 km comporte 5 virages serrés nécessitant 5 démarrages à partir de la vitesse nulle et que le reste du trajet puisse s'effectuer à la vitesse constante de 50 km/h, l'énergie que devra fournir la batterie pour compenser les pertes induites par l'aérodynamique et le roulement est, d'après les équations du paragraphe 4, de l'ordre de 1.73 kWh¹⁵. Dans ce cas, l'ascension complète nécessitera 9.6 kWh et le potentiel d'ascension du véhicule considéré (masse M=1900 kg, S_{MC} C_x et coefficient de roulement C_r respectivement égaux à 0.64 m² et 0.009) sera de 6 ascensions¹⁶ sur la base de 400 kg de batteries d'énergie massique égale à 150 Wh/kg.

6.2.4 Influences de la température : l'influence de la température sur la traînée aérodynamique n'est généralement pas prise en compte dans les bilans énergétiques. Les évolutions de la masse volumique de l'air et de la puissance aérodynamique exprimées en pourcentage lorsque la température extérieure varie de -20 degrés Celsius à +40 degrés Celsius sont reportées figure 24. Les évolutions de la puissance aérodynamique sont exprimées en pourcentage par rapport à la valeur déterminée pour la température extérieure T=0°C (273.15K). Ces résultats s'obtiennent pour une pression atmosphérique constante et une masse volumique de l'air déterminée à partir de la loi d'état des gaz parfait donnée par :

$$\rho = \rho_{cn} \frac{T_{cn}}{T}$$

avec ρ_{cn} et T_{cn} la masse volumique et la température de l'air pour les conditions normales respectivement égales à 1.293 kg/m³ et 273.15 K. La masse volumique de l'air et la puissance dissipée par l'aérodynamique diminuent lorsque la température augmente. Entre -20°C et +40°C la masse volumique diminue de 1.40 à 1.13 kg/m³. La puissance aérodynamique augmente de 7.9% lorsque la température diminue de 0 à -20°C et diminue de 6.8 à 12.8% lorsque la température augmente respectivement de 0 à +20°C puis de 0 à +40°C. Ces ordres de grandeur sont à prendre en considération pour le calcul de l'autonomie des batteries lors des périodes de froid intense.

6.2.5 Influences de la vitesse sur l'autonomie : les résultats précédents sont utilisés pour établir des abaques permettant d'accéder rapidement aux consommations d'énergie et aux masses de batteries nécessaires pour effectuer des parcours à différentes vitesses.

Vitesse	100 km	200 km	300 km	400 km	500 km	600 km	700 km	800 km	900 km	1000 km
50	9.4	18.8	28.2	37.6	47.0	56.4	65.8	75.2	84.6	94.0
70	12.2	24.4	36.6	48.9	61.1	73.3	85.5	97.7	109.9	122.1
90	16.0	31.9	47.9	63.9	79.8	95.8	111.7	127.7	143.7	159.6
110	20.6	41.3	61.9	82.6	103.2	123.9	144.5	165.2	185.8	206.5
130	26.3	52.5	78.8	105.1	131.4	157.6	183.9	210.2	236.5	262.7

Tableau 9 - Énergies consommées en kWh pour différents trajets parcourus à vitesse constante. Les vitesses 50 et 70 sont conservées car souvent associées à des vitesses moyennes sur des trajets routiers.

Les parcours de 100 à 1000 km sont effectués à vitesses stabilisées et les vitesses varient de 50 à 130 km/h. Ces abaques peuvent être utilisés pour des trajets effectués à vitesse constante tels des parcours autoroutiers mais également pour des parcours effectués à partir d'une vitesse moyenne. Les valeurs de 50 km/h et 70 km/h peuvent ainsi être prises comme références pour des trajets effectués sur route dans le respect de la réglementation (pas d'excès de vitesse) et de la sécurité (respect des distances de sécurité).

Pour une énergie à consommer ou une masse de batteries fixées, les courbes, reportées figures 25 et 26 associées aux tableaux 9 et 10, montrent que l'autonomie augmente significativement avec la réduction de la vitesse de déplacement. 105.1 kWh ou 701 kg de batteries permettent ainsi d'effectuer 400 km à 130 km/h, 500 km à 110 km/h, 600 km à 90 km/h et 800 km à 70 km/h. À ces réductions de vitesses sont

¹⁴ Énergie potentielle avec prise en compte du rendement $\eta = 0.72$ de la batterie à la roue soit $1900 \text{ kg} * 9.81 \text{ m/s}^2 * (1815 \text{ m} - 720 \text{ m}) / 0.72 = 28\,346\,812 \text{ J} = 28,3 \text{ MJ} = 28,3 \text{ MJ} * 1/3,6 \text{ kWh/MJ} = 7.87 \text{ kWh}$.

¹⁵ 5 fois l'énergie pour atteindre la vitesse de 50 km/h + l'énergie à fournir pour parcourir le trajet restant à la vitesse constante de 50 km/h soit $13 \text{ km} - 5 \text{ fois } 0.0392 \text{ km}$ où 0.0392 km est la distance pour atteindre la vitesse de 50 km/h sur la durée $\Delta t = 5.6 \text{ s}$ pour $\gamma = 2.5 \text{ m/s}^2$. Au total, le trajet de 13 km sur le plat nécessitera 1.72 kWh.

¹⁶ Exactement 6.25 ascensions sans prendre en compte la récupération d'énergie possible à la descente.

bien évidemment associées des augmentations des durées de parcours reportées figure 26 pour des vitesses qui diminuent de 130 à 110 km/h, de 130 à 90 km/h et de 110 à 90 km/h (tableau 11). Sur un trajet de 1000 km, le temps de parcours augmente d'1 heure et 24 minutes lorsque la vitesse diminue de 130 à 110 km/h mais cette réduction de vitesse permet d'accroître l'autonomie de 56.2 kWh (262.7 kWh - 206.5 kWh, voir le tableau 9) ou de 272 km (100 km * 56.2 kWh/20.6 kWh pour 100 km, à 110 km/h, voir le tableau 9 et la figure 17).

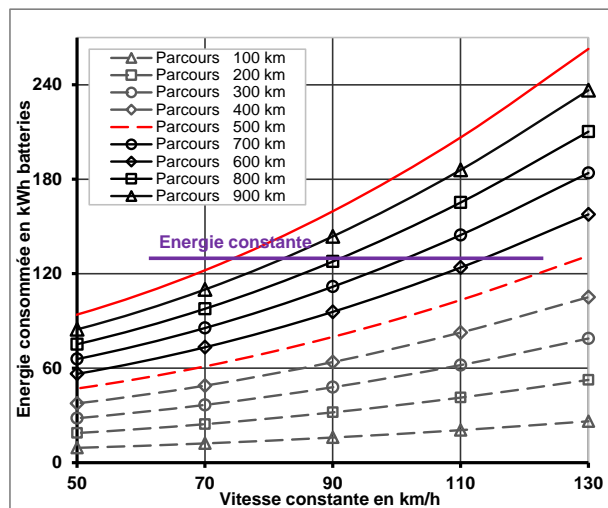


Fig. 25 – Énergies consommées pour différents parcours de 100 à 1000 km à différentes vitesses de 50 à 130 km/h.

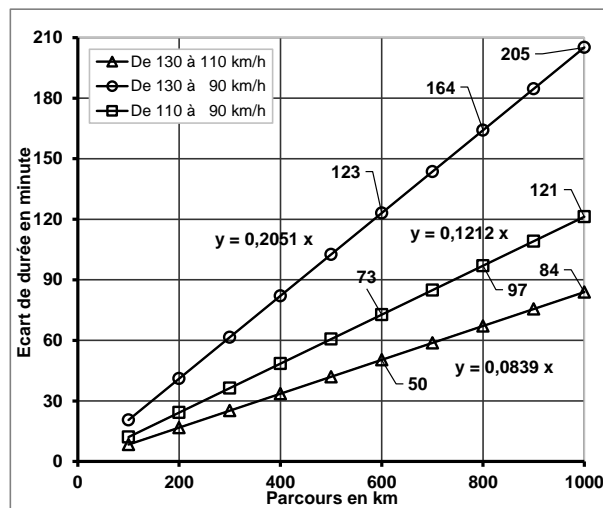


Fig. 26 – Différences sur les durées de parcours pour différents écarts de vitesses pour différentes distances à parcourir (les vitesses sont supposées constantes).

Masse roulante du véhicule $M=1900$ kg, produit $SC_x = 0.64$ m² et coefficient de roulement $C_r = 0.009$.

Vitesse	100 km	200 km	300 km	400 km	500 km	600 km	700 km	800 km	900 km	1000 km
50	63	125	188	251	313	376	439	501	564	627
70	81	163	244	326	407	489	570	651	733	814
90	106	213	319	426	532	639	745	851	958	1064
110	138	275	413	551	688	826	964	1101	1239	1377
130	175	350	525	701	876	1051	1226	1401	1576	1752

Tableau 10 – Masses de batteries en kg nécessaires aux différents trajets parcourus à vitesse constante.

Parcours en km	De 130 à 110 km/h en heure	De 130 à 90 km/h en heure	De 110 à 90 km/h en heure	De 130 à 110 en minute	De 130 à 90 en minute	De 110 à 90 en minute
100	0.14	0.34	0.20	8	21	12
200	0.28	0.68	0.40	17	41	24
300	0.42	1.03	0.61	25	62	36
400	0.56	1.37	0.81	34	82	48
500	0.70	1.71	1.01	42	103	61
600	0.84	2.05	1.21	50	123	73
700	0.98	2.39	1.41	59	144	85
800	1.12	2.74	1.62	67	164	97
900	1.26	3.08	1.82	76	185	109
1000	1.40	3.42	2.02	84	205	121

Tableau 11 – Écarts de durée sur les parcours pour différentes réductions de vitesse sur autoroute.

7. RÉSULTATS POUR UN VÉHICULE À MOTEUR THERMIQUE

Les résultats présentés au paragraphe précédent, obtenus pour un rendement¹⁷ η_E^{m+t} de la batterie à la roue égal à 0.72 pour des véhicules Électriques, sont transposables aux véhicules à moteur Thermique. Si η_T^{m+t} désigne le rendement des moteurs Thermiques du réservoir à la roue, alors les puissances et les

¹⁷ Indices E pour Électrique, T pour Thermique

énergies dissipées dans les véhicules à moteurs Thermique (W_T^i, W_E^i) et Électrique ($\Delta E_T^i, \Delta W_E^i$) sont respectivement liées par les relations :

$$\Delta E_T^i = \frac{\eta_E^i}{\eta_T^i} \Delta E_E^i \quad W_T^i = \frac{\eta_E^i}{\eta_T^i} W_E^i \quad \text{avec } i = [m, t, m + t]$$

Pour les rendements retenus dans ce document, les puissances et les énergies pour la filière thermique s'obtiennent en multipliant par le rapport η_E^i/η_T^i les puissances et les énergies dissipées dans le véhicule à moteur électrique. En considérant les rendements du moteur et de la transmission, le rapport η_E^i/η_T^i s'élève à 3 pour $\eta_E^{m+t}=0.72$ ($0.90*0.80$) et $\eta_T^{m+t}=0.24$ ($0.30*0.80$). Cette valeur justifie à elle seule l'intérêt de développer les mobilités électriques pour assurer respectivement les déplacements urbains quotidiens inférieurs à 15 km et occasionnels pour les distances supérieures [7]. Ce développement doit s'effectuer en parallèle de travaux destinés à augmenter la capacité énergétique des batteries¹⁸, diminuer la masse des véhicules, améliorer l'aérodynamique¹⁹, accroître l'efficacité des systèmes de propulsion (moteurs roues²⁰) et développer les énergies renouvelables ainsi que les biocarburants de seconde génération [H] et synthétiques [8]. Toutes ces actions doivent s'engager avec la volonté de réduire la dépendance planétaire aux énergies fossiles et limiter les effets d'une crise climatique annoncée et déjà perceptible [3].

8. CONCLUSION

Les véhicules électriques devant remplacer progressivement les véhicules à moteur thermique, ce document analyse l'équivalence énergétique des carburants et des batteries, identifie le nombre de centrales électriques qu'il faudrait mettre en place pour répondre au remplacement du parc automobile actuel de véhicules thermiques puis rappelle les conditions d'utilisation et les solutions de motorisation.

Des relations analytiques sont ensuite proposées pour estimer par le calcul les puissances et les énergies dissipées par l'inertie, l'aérodynamique et le roulement. Quel que soit le mouvement effectué à vitesse constante ou uniformément accéléré, la puissance à mettre en œuvre pour compenser les pertes d'énergie aérodynamique varie en fonction du cube de la vitesse alors que la puissance à mettre en œuvre pour compenser les pertes par écrasement et frottement des pneumatiques évolue de manière linéaire. Pour des véhicules des segments B à D, les accélérations des véhicules actuels sont comprises entre 2.3 et 3.0 m/s² et l'énergie dissipée par le roulement représente près du quart de l'énergie totale dissipée à 130 km/h.

L'autonomie des véhicules électriques actuels est ensuite analysée sur la base des résultats proposés par Bertrand Bellois pour l'Argus [L]. Ces résultats s'appuient sur les consommations d'énergies électriques relevées sur deux trajets, un trajet routier et un trajet autoroutier. Les résultats sont utilisés pour déterminer les autonomies puis complétés d'informations sur les prix d'achat et les masses à vide pour établir des ratios et déterminer des grandeurs statistiques. Sur un total de 41 véhicules équipés de batteries Li-ion, les moyennes des énergies consommées et des masses embarquées de batteries s'élèvent respectivement à 64 kWh et 429 kg. À ces valeurs moyennes sont associées des médianes, respectivement égales à 64 kWh et 427 kg, qui attestent d'une distribution adaptée de l'échantillon. Des variations importantes apparaissent sur les énergies embarquées pour de faibles variations de prix, une différence de 34 kWh est ainsi relevée pour une différence de prix de 2 k€. Les masses à vide et les énergies embarquées, conditionnées par le volume de batteries, varient quasi-linéairement en fonction du prix d'achat, à l'exception des modèles haut de gamme tels la Mercedes EQS 480+ ou la Porsche Taycan. Malgré un nombre plus important de démarrages sur les parcours routiers, les autonomies sur route restent toujours supérieures aux valeurs relevées sur autoroute ; un résultat en partie lié à l'efficacité des systèmes de récupération d'énergie utilisés lors des phases de décélération et/ou de freinage. Aucun véhicule électrique ne dispose enfin aujourd'hui d'un plein d'énergie embarquée comparable à 50 litres de gasoil ou d'essence. Fin 2022, le véhicule qui offre les plus grandes autonomies sur route et autoroute,

¹⁸ Multiplier par 10 la capacité énergétique des batteries, de 150 à 1500 Wh/kg (batterie Lithium/air).

¹⁹ Réduire de 30% le coefficient de traînée aérodynamique, de $C_x=0.30$ à $C_x=0.20$.

²⁰ Moteurs-roues, des gains de 25 à 35% sont envisageables sur des trajets mixtes et urbains [9].

respectivement de 667 et 495 km, est la Mercedes EQS 480+ vendue autour de 136 k€ [L].

Les valeurs moyennes des produits des maîtres couples par les coefficients de traînée aérodynamique et des masses de véhicules sont ensuite utilisées pour estimer, à partir des équations, les énergies et les puissances nécessaires à la mise en mouvement pour différentes accélérations, masses de véhicules et vitesses à atteindre. Pour les trajets effectués à accélération constante, des ordres de grandeur sont fournis pour les puissances et les énergies qui permettent d'atteindre des vitesses comprises entre 10 et 130 km/h. Pour un véhicule de 1900 kg disposant d'un pack de batteries d'énergie massique 150 Wh/kg et d'un moteur électrique capable de fournir une accélération de 2.5 m/s², 5 kg (4.7 kg exactement) de batteries sont nécessaires pour atteindre, à partir d'une position arrêtée, la vitesse de 130 km/h. Les résultats montrent que la contribution aérodynamique dans les puissances à mettre en œuvre et les énergies dissipées diminuent avec l'augmentation de la masse et de l'accélération.

Pour des trajets effectués à vitesse constante, la masse n'intervient que par son incidence sur la résistance au roulement et la traînée aérodynamique représente 3 fois la contribution du roulement à 130 km/h. Pour cette vitesse et des véhicules électriques équipés de batteries Lithium-Ions d'énergie massique égale à 150 Wh/kg, 175 kg de batteries sont nécessaires pour parcourir 100 kms.

L'influence de l'aérodynamique sur l'autonomie et la masse de batteries à embarquer est ensuite analysée en considérant possible de réduire le coefficient de traînée aérodynamique de 10, 20 et 30%. Ces réductions permettent d'accroître l'autonomie de 8, 15 et 23% ou de réduire des mêmes pourcentages la masse de batteries embarquées. Ces résultats montrent l'importance de s'intéresser aux nouvelles solutions de contrôle aérodynamique proposées par la communauté scientifique depuis plus de 20 ans.

Une analyse des influences de l'altitude et de la température est également effectuée. Pour la configuration retenue, M=1900 kg, S_{MC} C_x=0.64 m² et C_r=0.009, 7.2 kWh sont nécessaires pour élever de 1000 m un véhicule électrique de 1900 kg. Cette valeur représente un peu plus du huitième de l'énergie disponible d'un ensemble de 400 kg de batteries estimée à 60 kWh. La puissance aérodynamique augmente enfin de 7.9% lorsque la température diminue de 0 à -20°Celsius et diminue de 12.8% lorsque la température augmente de 0 à +40° Celsius. Ces ordres de grandeur montrent l'importance de s'intéresser à la gestion de la température extérieure. Des abaques sont enfin proposés pour accéder rapidement aux consommations d'énergie et aux masses de batteries nécessaires pour effectuer des parcours à différentes vitesses.

S'agissant de réduire aussi vite que possible le recours aux énergies fossiles et tant qu'aucune autre solution ne sera trouvée pour améliorer la densité massique d'énergie des batteries, les résultats présentés dans cet article confirme la nécessité d'un changement profond dans la gestion de l'énergie. L'énergie bon marché et abondante appartient au passé.

RÉFÉRENCES

- [1] Gilliéron P. ; Une lecture du dérèglement climatique et de ses conséquences en Île-de-France, 2016, hal-01573051.
- [2] Global Carbon Budget, research project of futur earth, 11 novembre 2022.
- [3] Changement Climatique : les éléments scientifiques du GIEC, Ministère de la Transition Écologique, 21144 DICOM / - Août 2021.
- [4] Organisation Météorologique Mondiale ; Alertes précoces et actions rapides, Bulletin, Volume 7.1 (1) – 2022.
- [5] Gilliéron P. ; Aviation Légère Électrique Pile à Combustible ou Batteries ? 2022, hal-03509424.
- [6] Union Routière de France (URF) ; Faits et chiffres 2022, Statistiques des mobilités en France et en Europe, page 56, Consommation de carburants routiers par catégories de véhicules.
- [7] Insee Première, n°1835, janvier 2021.
- [8] Une usine de production de kérosène synthétique pour Lufthansa, Air et Cosmos n°2794, 1er septembre 2022.
- [9] Langlois P. ; Rouler sans pétrole, Éditions MultiMondes, ISBN n°978-2-89544-130-4, 2008.
- [10] Nouvelle Renault Mégane E-Tech 100% Électrique, catalogue 2022, page 30.

-
- [11] Gilliéron P. and Noger C.; Contribution to the analysis of transient aerodynamic effects acting on vehicles, SAE paper n°2004-01-1311, SAE Congress, Detroit, Michigan, USA, March 2004.

SITES INTERNET DE RÉFÉRENCE

- [A] <https://globalcarbonbudget.org/carbonbudget/>
[B] <https://www.carbone4.com/publication-scenarios-ssp-adaptation>
[C] <https://unfccc.int/fr/news/le-transport-durable-la-cle-de-la-lutte-contre-la-crise-climatique>
[D] <https://www.vie-publique.fr/fiches/20413-quelles-evolutions-de-la-politique-de-lenvironnement-europeenne>
[E] <https://www.vie-publique.fr/en-bref/285406-les-eurodeputes-votent-linterdiction-des-moteurs-thermiques-en-2035>
[F] https://bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?pci_et_masse_volumique.htm
[G] <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5013868>
[H] <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/quel-avenir-les-biocarburants>
[I] <https://insideevs.fr/news/593904/moteur-electrique-roue-lightyear/>
[J] <https://www.caradisiac.com/>
[K] <https://zperfs.com/>
[L] <https://www.largus.fr/actualite-automobile/autonomie-des-voitures-electriques-les-resultats-de-nos-tests-10283401.html>

SITES INTERNET UTILES

<https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=averz+barom%C3%A8tres+des+immatriculations>

NOMENCLATURE

C	Constante de temps, homogène à un temps, en seconde (s).
C_x	Coefficient de traînée aérodynamique, sans dimension.
C_r	Coefficient de roulement, sans dimension.
ΔE_{aero}	Énergie dissipée par l'aérodynamique, en Joule (J), en Wh ou en kWh.
ΔE_{roul}	Énergie dissipée par le roulement, en Joule (J), en Wh ou en kWh
$\Delta E_{v,g}$	Énergie dissipée pour la masse (v pour la mise en vitesse & g pour pesanteur), en Joule (J), en Wh ou kWh.
ΔE_g	Énergie dissipée pour la masse (g pour pesanteur), en Joule (J), en Wh ou en kWh.
ΔE_{aero}^{η}	Énergie dissipée par l'aérodynamique avec perte de rendement, en J, Wh ou kWh.
ΔE_{roul}^{η}	Énergie dissipée par le roulement avec perte de rendement, en J, Wh ou kWh
$\Delta E_{v,g}^{\eta}$	Énergie dissipée pour la masse (v pour la mise en vitesse & g pour pesanteur) avec perte de rendement, en J, Wh kWh.
ΔE_g^{η}	Énergie dissipée pour la masse (g pour pesanteur) sans mise en vitesse avec perte de rendement, en Joule (J), Wh ou kWh.
ΔE_E^i	Énergie dissipée dans le circuit i du véhicule Électrique avec $i = [m, t, m + t]$, m pour le circuit de la batterie à la sortie du moteur, t pour le circuit du moteur à la roue (transmission) et m+t pour les circuits m et t. En Joule (J), en Wh ou en kWh.
ΔE_T^i	Énergie dissipée dans le circuit i du véhicule Thermique avec $i = [m, t, m + t]$, m pour le circuit du réservoir à la sortie du moteur, t pour le circuit du moteur à la roue (transmission) et m+t pour les circuits m et t. En Joule (J), en Wh ou en kWh.
ΔE_r^{η}	Énergie de récupération (ralentissement et freinage), en Joule (J), en Wh ou en kWh.

ΔE_c^η	Énergie consommée au niveau de la batterie, en Joule (J), en Wh ou en kWh.
g	Accélération de la pesanteur, en m/s ² .
K	Degré Kelvin, 1 K = 1°C.
M	Masse du véhicule, en kg.
S _{MC}	Maître couple, en m ² .
V, V ₀	Vitesses, en m/s ou en km/h.
L	Longueur ou distance, en m ou en km.
t	Temps en seconde (s), en minute (min) ou en heure (h).
T _{cn}	Température pour les conditions normales, en kg/m ³ .
W _{aero}	Puissance aérodynamique, en Watt (W) ou en kW.
W _{roul}	Puissance pour le roulement, en Watt (W) ou en kW.
W _{v,g}	Puissance associée à l'énergie pour l'inertie (v) & la pesanteur (g), en Watt (W) ou en kW.
W _g	Puissance associée à l'énergie pour la pesanteur (g), en Watt (W) ou en kW.
W _c ^η	Puissance délivrée par ou consommée à la batterie, en Watt (W) ou en kW.
Z	Altitude en m.
γ	Accélération, en m/s ² .
Δ	Variation de quantités scalaires, sans dimension.
η _m	Rendement du moteur électrique, sans unité.
η _t	Rendement de transmission, du moteur à la roue, sans unité.
η	Rendement global de la batterie à la roue, sans unité.
η _r	Rendement de récupération d'énergie lors du levée de pied ou du freinage, sans unité.
η _E ⁱ	Rendement du circuit i pour le véhicule Électrique avec i = [m, t, m + t], m de la batterie à la sortie du moteur, t pour la transmission et m+t pour le rendement global.
η _T ⁱ	Rendement du circuit i pour le véhicule Thermique avec i = [m, t, m + t], m du réservoir à la sortie du moteur, t pour la transmission et m+t pour le rendement global.
μ	Ratio : puissance aérodynamique / puissance aérodynamique et roulement, sans unité.
ρ	Masse volumique, en kg/m ³ .
ρ _{cn}	Masse volumique pour les conditions normales, en kg/m ³ .

ANNEXE 1 – Données fournies par Bertrand Bellois, ARGUS [L]

Modèles véhicules	Consommation autoroute pour 100 km en kWh	Autonomie réelle autoroute en km	Consommation route pour 100 km en kWh	Autonomie réelle route en km
Aiways U5	27.2	232	18.5	341
Audi Q4 Sb 50 Quattro 82 kWh (hiver)	32.4	237	18.5	419
BMW i4 eDrive40	24.4	330	15.7	513
BMW iX 50 xDrive	27.0	389	20.3	519
Citroën ë-C4	24.2	191	15.5	298
Dacia Spring	Non documenté	Non documenté	15.1	182
DS3 E-Tense	29.1	158	17.7	259
Fiat 500 électrique	21.9	170	16.4	227
Ford Mustang Mach-E	25.8	341	17.0	519
Honda e	31.6	112	20.5	173
Hyundai Ioniq 5	26.6	273	18.4	395
Hyundai Kona Electric 39 kWh	22.3	176	13.7	286
Hyundai Kona Electric 64 kWh	21.7	295	13.4	477
Kia e-Niro	21.1	303	14.8	433
Kia EV6	20.6	376	14.5	532
Kia Niro EV (2022) 64,8 kWh	23.2	279	13.9	467
Mazda MX-30	30.3	117	20.0	177
Mercedes EQA 250	24.4	273	17.6	378

Modèles véhicules (suite page 22), ARGUS [L]	Consommation autoroute pour 100 km en kWh	Autonomie réelle autoroute en km	Consommation route pour 100 km en kWh	Autonomie réelle route en km
Mercedes EQE 350+	23.3	389	16.8	538
Mercedes EQS 450+	21.8	495	16.2	667
MG Marvel R 4WD	28.3	248	18.9	384
MG ZS EV	24.6	273	18.7	359
Nissan Leaf e+	23.6	237	15.2	368
Peugeot e-2008	24.6	188	15.5	298
Peugeot e-208 2020	24.2	190	18.2	255
Peugeot e-208 2022	23.3	198	14.9	311
Peugeot e-Rifter	30.1	154	21.8	212
Porsche Taycan Perf Plus 93,4kWh	21.5	389	15.2	552
Renault Mégane Électrique 60 kWh	24.2	248	14.3	419
Renault Zoé R110	26.2	198	17.5	298
Renault Zoé R135	24.3	214	17.1	304
Skoda Enyaq 80x	26.8	287	16.0	483
Tesla Model 3 Grande Autonomie (2021)	23.1	321	14.4	513
Tesla Model 3 Propulsion (2022)	19.3	295	14.0	407
Tesla Model 3 standard Plus (2020)	21.8	227	13.1	378
Tesla Model Y Grande Autonomie (hiver)	24.4	303	15.5	477
Volkswagen e-up!	21.0	154	11.5	280
Volkswagen ID.3	21.3	273	13.3	438
Volkswagen ID.4	24.7	311	13.8	560
Volkswagen ID.5	24.0	321	16.6	464
Volvo XC40 Twin Recharge	32.3	232	20.4	368

Crédit ARGUS, d'après Bertrand Bellois, 18 octobre 2022 [L],
classement par ordre alphabétique des marques.

Note : les figures et les tableaux du paragraphe 6 « Résultats et discussion », dont les positionnements ont été contraints par leurs dimensions dans les pages, ne sont pas nécessairement positionnés dans les sous-paragraphe correspondants.