

Impact de l'usage d'un petit véhicule électrique sur le bilan énergétique et carbone d'un foyer « en transition »

Vincent Bourdin

LIMSI, CNRS, Rue John von Neumann – F-91405 Orsay cedex

Jordi Badosa

LMD, CNRS - École Polytechnique, Route de Saclay – F-91128 Palaiseau

Fausto Calderón-Obaldía, Anne Migan Dubois

GeePs, CNRS – CentraleSupélec – U-PSud – UPMC, 11 rue Joliot-Curie – F-91192 Gif-sur-Yvette



Contexte : les véhicules électriques sont parfois vus comme la solution aux problèmes de pollution urbaine et même comme l'un des outils principaux de la transition énergétique [1, 2]. Certains auteurs au contraire restent circonspects insistant sur les émissions carbone, énergies grises, et pollutions dues aux activités minières et manufacturières notamment celles liées à la production des batteries d'accumulateurs, des aimants permanents (fréquemment utilisés dans les moteurs compacts à haut rendement), et des composants électroniques de commandes... De plus ils soulignent le fait que la production électrique mondiale est fortement carbonée (40 % est obtenue par combustion de charbons), enfin ils considèrent comme irréaliste un transport basé sur plusieurs milliards de véhicules individuels en circulation dans des zones urbaines déjà saturées [3]...

Dans le cadre du projet Trend'X nous considérons la traction électrique comme une option possible (avec ou sans accumulateur), de préférence dans le cadre de transports en commun, à mettre en œuvre parallèlement avec des efforts drastiques de sobriété (réorganisation urbaine, télétravail, réduction des déplacements motorisés de loisirs...) Bien utilisé, le véhicule électrique avec accumulateur embarqué pourrait aussi contribuer à la stabilisation des réseaux électriques moyennant le développement de réseaux de transport et communication adaptés et d'algorithmes de management optimaux. Nous nous devons donc d'évaluer précisément le potentiel des technologies de traction électrique.

L'expérience que nous menons depuis bientôt 3 ans sur une « citadine » n'a pas pour ambition de traiter le sujet de façon exhaustive, mais de nous permettre de « toucher du doigt » différents aspects du système véhicule électrique dans la vie réelle afin de mieux orienter nos recherches vers les bonnes solutions techniques. Dans cette étude nous n'incluons pas encore, par manque de temps et d'informations fiables, l'énergie grise et les impacts matériaux résultants de l'analyse du cycle de vie du véhicule (ACV), nous nous limitons à la consommation énergétique et aux émissions indirectes dues à l'utilisation. Cette étude est basée sur 33 mois de mesures de la consommation du véhicule et plus de 10 ans de suivi des consommations domestiques d'un pavillon rénové (140 m² habitables) aujourd'hui occupé par 2 à 4 personnes (3 en moyenne).

Le véhicule en test

Il s'agit d'une « citadine » 4 places propulsée par un moteur synchrone à aimants permanents Nd avec les caractéristiques principales suivantes :

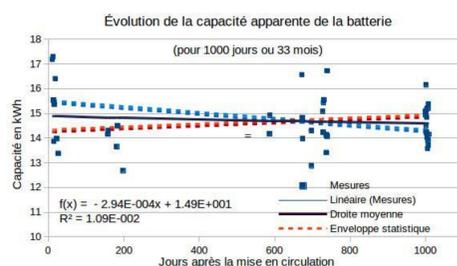
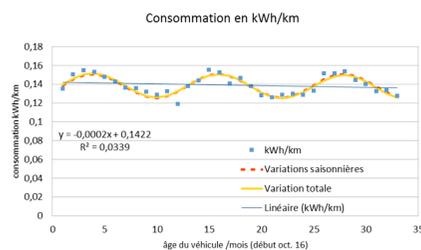
- masse = 1 140 kg
- hauteur = 1,608 m
- largeur = 1,475 m

Principaux résultats antérieurs [4]

- Pour un usage raisonné (11 000 km/an), la consommation du véhicule est **compensée** par un toit photovoltaïque de surface inférieure à 25 m²,
- ajouter des surface photovoltaïques au véhicule permettrait d'autoproduire en toute saison plus de 10% de l'énergie du véhicule et de prolonger d'autant son autonomie. Les surfaces disponibles sont le toit, le capot, les vitrages et portières,
- La consommation spécifique (moyenne 0,138 kWh/km) varie suivant la saison de $\pm 9,2\%$
- Avec une conduite économique, grâce à la récupération d'énergie mécanique au freinage, et grâce au rendement exceptionnel des moteurs électriques et des centrales électriques à cycles combinés, un petit véhicule est très efficace pour réduire la consommation d'énergie et les émissions de GES. C'est vrai en particulier sur le réseau Français avec 8,4 gCO₂/km avec recharge aux heures creuses mais partout dans le monde.

Méthodes et résultats

- Les batteries Li-ion sont systématiquement rechargées lentement (8 A), pendant les heures creuses (22h-6h), dans un garage (T>10°C). La consommation des auxiliaires (relais, chargeur, lignes intérieure est prise en compte dans le bilan. Elle reste inférieure à 1% du total.
- Les consommations de chaque recharges ont été mesurées par un compteur d'énergie conforme aux normes. La mesure est toujours réalisée pour deux positions de même altitude.

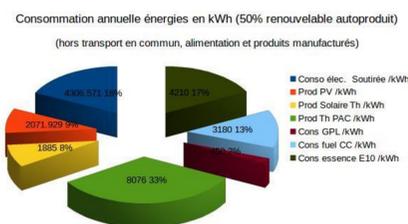


Au bout de 33 mois et 30500 km la consommation spécifique 0,138 ± 0,07 kWh/km n'a pas augmenté, une fonction sinusoïdale d'amplitude $\pm 9,2\%$ explique 79% de la variance. Cette fonction pourra être utile pour la prévision de consommation. 84% de la variance peut être expliquée par les variations de température ambiante lors de la charge et de l'utilisation. Il n'est pas impossible que la capacité de batterie suive aussi un cycle annuel.

Cette capacité (14,9 ± 0,6 kWh au départ) semble diminuer de 0,7%/an, mais à ce stade de l'étude nous ne pouvons pas démontrer statistiquement cette diminution (au risque α 5% la variation est entre +1,5 et -2,8%).

Conclusions

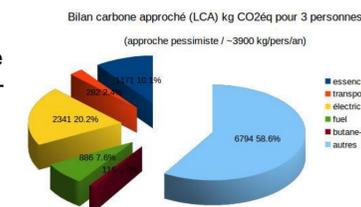
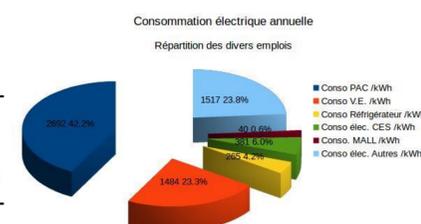
- Après 33 mois et 30500 km, l'efficacité n'a pas changé, la perte d'autonomie est faible ($\approx 2\%$).
- Les évolutions saisonnières ($\pm 9,2\%$) de la consommation spécifique sont bien décrites par une sinusoïde et bien corrélées avec la température ambiante, donc prévisibles dans le cadre du management de l'énergie.
- L'impact énergétique et carbone d'un petit véhicule utilisé pour des trajets journaliers en moyenne de 31km, est faible même pour un foyer particulièrement économe en énergie.
- Il semble possible, moyennant une sobriété assumée et une gestion judicieuse, d'absorber la recharge de petits véhicules sur le réseau. Ils restent donc des options de moyen terme.
- La question des impacts matériaux que nous n'avons pas abordée reste ouverte.
- Cet exemple laisse peu de marge pour réduire d'un facteur 4 les émissions et montre que la transition écologique nécessitera soit une sobriété drastique, i.e. une forte réduction de l'empreinte des produits et services, soit une transition démographique générale et rapide.



Le foyer étudié ici, utilise un chauffe eau solaire (CES), il est chauffé par une pompe à chaleur (PAC) et une petite chaudière d'appont au fuel évitant de surcharger le réseau aux périodes froides où l'électricité est fortement carbonée et où l'efficacité (EEC ou COPc) de la PAC est faible. De même une partie de la cuisson/chauffage des aliments est réalisée avec une cuisinière à gaz butane-propane (GPL), enfin un petit véhicule à essence est utilisé en dernier recours. L'énergie achetée est $\approx 30\%$ de la moyenne française par tête.

L'ensemble des consommations énergétiques annuelles, incluant les productions thermiques renouvelables du CES et de la PAC est présenté dans le graphe ci-dessus. On note que 50% de l'énergie est d'origine renouvelable autoproduite (41% de chaleur et 9% d'électricité photovoltaïque). On notera aussi que seulement 18% des apports viennent d'électricité soutirée au réseau dont 56% en heures creuses (HC). Nous définissons un « taux de report » vers les HC par : $T_r = E_{HC}/E_{HP} * \Delta t_{HP}/\Delta t_{HC} = 2,55$. Autrement dit la puissance moyenne appelée en HC est 2,6 fois plus forte qu'en HP. La puissance moyenne annuelle soutirée au réseau est ≈ 492 W pour 3 personnes. Il faut noter cependant que 32% de l'énergie reste carbonée dont 54% pour le véhicule à essence (500 L/an d'essence sans plomb 95 E 10).

La figure ci-contre décrit les différents emplois de l'électricité. On notera que l'énergie du véhicule électrique ne représente que 23% du total et 72% de la production d'un toit PV de 18m² et dont la puissance n'est que 54% de celle des modules actuels de même surface! Pour relativiser un peu plus il faut noter que la puissance de recharge n'est que 1860W soit moins que de nombreux lave-vaisselles, fer à vapeur ou aspirateurs. Cela ne signifie pas que tous les véhicules puissent être rechargés en même temps sur le réseau, mais en organisant cela devient possible, notamment avec une recharge autour de midi basée sur le solaire et le transport par réseau. Le bilan carbone ci-contre (à affiner) montre que le terme dominant reste à ce stade la consommation alimentaire, les emballages et les produits manufacturés. Pour l'électricité nous avons appliqué la méthode du contenu carbone marginal. La production carbone reste environ égale à 44% de la moyenne nationale. Il reste à supprimer le véhicule à essence, mais pour diviser encore par 2 il faudrait réduire les emballages, les produits manufacturés et transportés, certains services...



References

- [1] H. Jian, "Electric cars essential to an energy transition," TAIPei Times, p. Page 8, Nov. 2017.
- [2] Anonymous, "Electric Cars." [Online]. Available: <http://www.greenfuelonline.com/electric>
- [3] J.-M. Jancovici, "Is the electric car an ideal solution for tomorrow's mobility?" Aug. 2015. [Online]. Available: <https://jancovici.com/en/energy-transition/transportation/is-the-electric-car-an-ideal-solution-for-tomorrows-mobility/>
- [4] V. Bourdin et al, "Energy transition: electric Vehicles, smartgrids and PV - Feedback of 19 month using of a small electric car", JSS2018

Remerciements

Nous tenons à adresser nos remerciements à l'équipe techniques du SIRTa pour la disponibilité des mesures climatiques. Ce travail bénéficie du soutien du «Siebel Energy Institute» et il a été conduits dans le cadre du programme de recherche TREND-X de l'École Polytechnique, qui bénéficie du soutien de la Fondation de l'École Polytechnique.