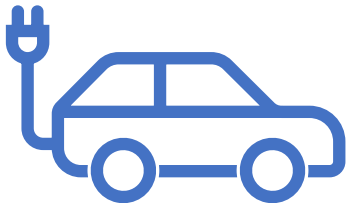
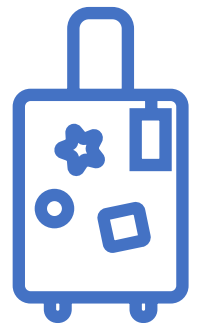


L'avènement de la voiture électrique

Sa relation autonomie vs prix d'achat et les contraintes liées en vue des longs déplacements à vocation touristique



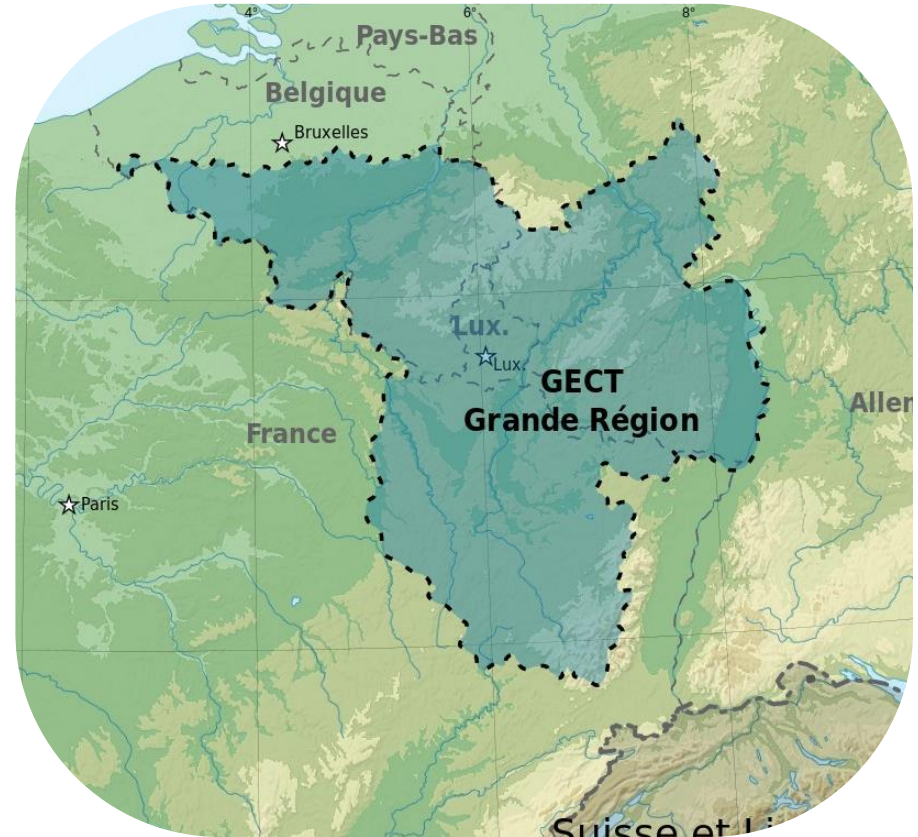
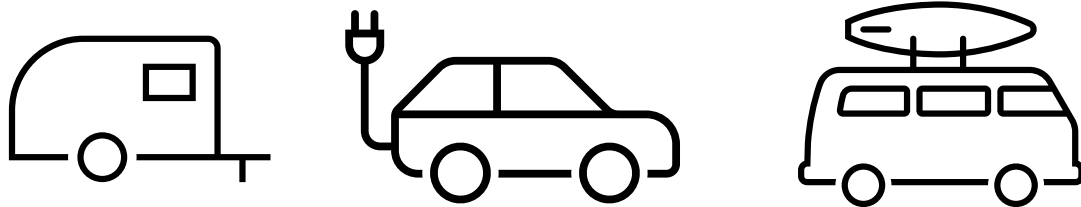
Romain Vanderbeeken, PhD student
Pierre Duysinx, Professeur Ordinaire
ULiege – Laboratoire d'Ingénierie des Véhicules terrestres



Entre résilience, durabilité et Intelligence Artificielle (IA)
Quels enjeux pour les acteurs du secteur du tourisme en zone transfrontalière ?
8-9 décembre 2023, Tétange, Luxembourg

Introduction

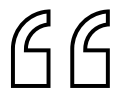
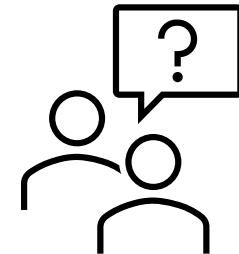
- L'avènement de la voiture électrique va-t-il ...
 - diminuer ↘
 - amplifier ↗
 - changer ?
- ... le tourisme à courte distance ?
- Dans la perspective du tourisme régional, comment les habitudes de transport en voiture personnelle sont-elles modifiées?



Introduction

Démystifions le véhicule électrique

- Le tourisme doit-il s'accommoder du VE?
- Comment vaincre les freins à l'utilisation du VE pour le tourisme?
 - Coûts
 - Recharge
 - *Range anxiety*



Ideally, people may come to view EVs not as short-range combustion vehicles but as a new, distinct mode of transportation.



cité dans Franke, T. et Krems, J.F. (2013)

Plan

① Relation autonomie de la voiture électrique (VE) vs prix d'achat

- ☐ Distribution du prix d'achat
- ☐ Concept de Coût Total de Possession
- ☐ Distribution du Coût Total de Possession
- ☐ Autonomie

② Contraintes liées aux VEs en vue des longs déplacements à vocation touristique

- ☐ Aspect humain: relation utilisateur – VE
 - ☐ *Range anxiety*
- ☐ Gestion de la recharge
- ☐ Augmentation de la consommation d'énergie en voyage

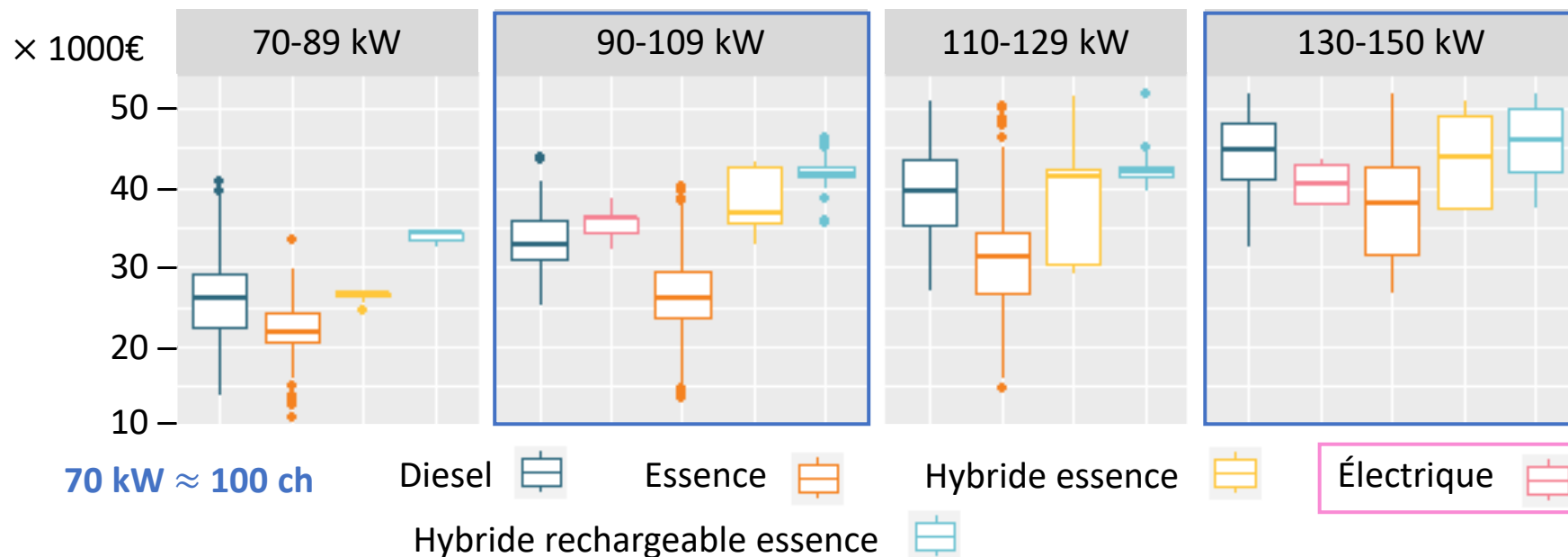


Prix d'achat vs coût total de possession

Réponse basée sur une étude du Bureau Fédéral du Plan (Belgique, 2021)

Distribution du prix d'achat des véhicules

- Distribution du prix d'achat selon la motorisation (puissance – carburant)
- Voitures privées, SUV, Belgique, 2021
- SUV: 52% de part de marché



Le coût d'achat n'est pas un tout! → Coûts variables et de maintenance

Coût total de possession

Le coût d'achat n'est pas un tout: + coûts variables + coûts de maintenance

→ Concept de Coût Total de Possession

$$TCO = (1 + VAT_{car})p_x + TMC - \frac{RV}{(1 + i)^n} + \frac{(1 - (1 + i)^{-n})}{i} ([1 + VAT_{fuel}]p_y y + AnnFixCosts)$$

↓

Prix d'achat

↓

Taxe de mise
en circulation

↓

Valeur à la
reprise

↓

Consommation
de carburant

↓

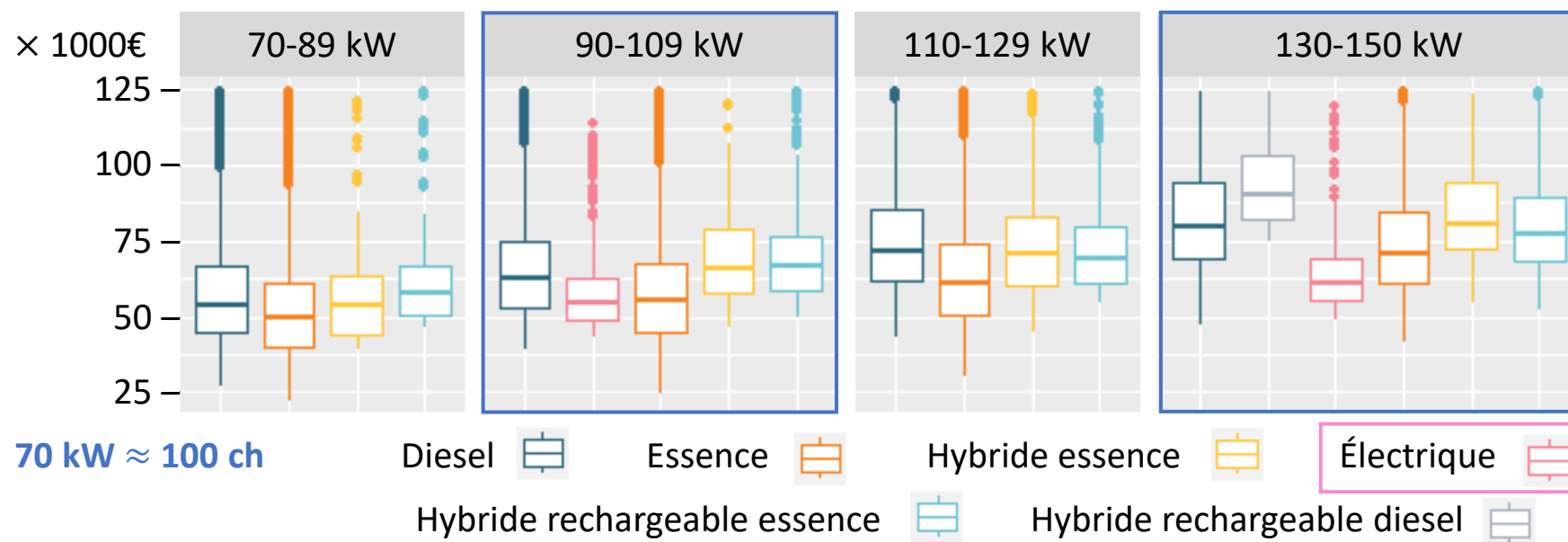
Coûts fixes
annuels

i: perte de la valeur
n: durée de vie économique (*n* = 10 ans)
RV = 0

- Des avantages fiscaux sont généralement offerts aux modèles électrifiés (hybride, hybride rechargeable et électrique) mais dépendent souvent du statut juridique du propriétaire (privé ↔ société)

Distribution du coût total de possession

- Distribution du TCO selon la motorisation (puissance – carburant)
- Voitures privées, SUV, Wallonie, 2021

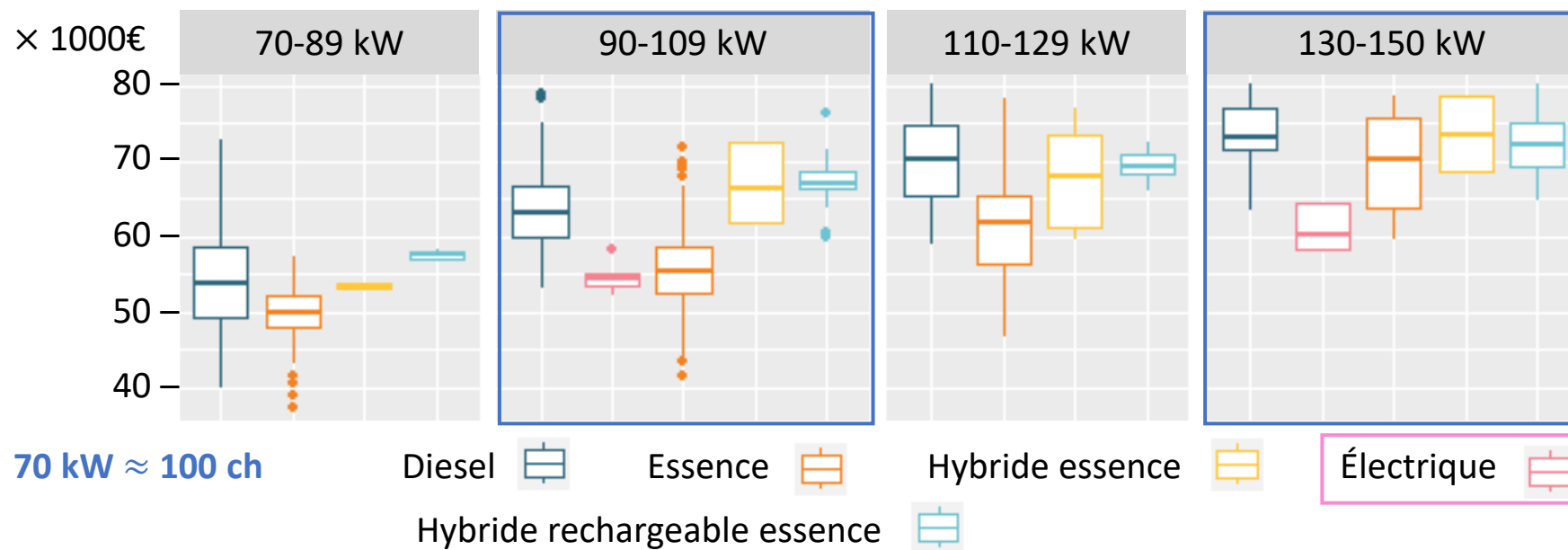


→ Chevauchement du TCO jusqu'à 129 kW

- Kilométrage annuel
- VE: relation autonomie – prix
- Diversité de l'offre
- Parts de marché

Distribution du coût total de possession – 15000 km/an

- Distribution du TCO selon la motorisation (puissance – carburant)
 - Prise en compte du kilométrage annuel: conducteur moyen
- Voitures privées, SUV, Wallonie, 2021

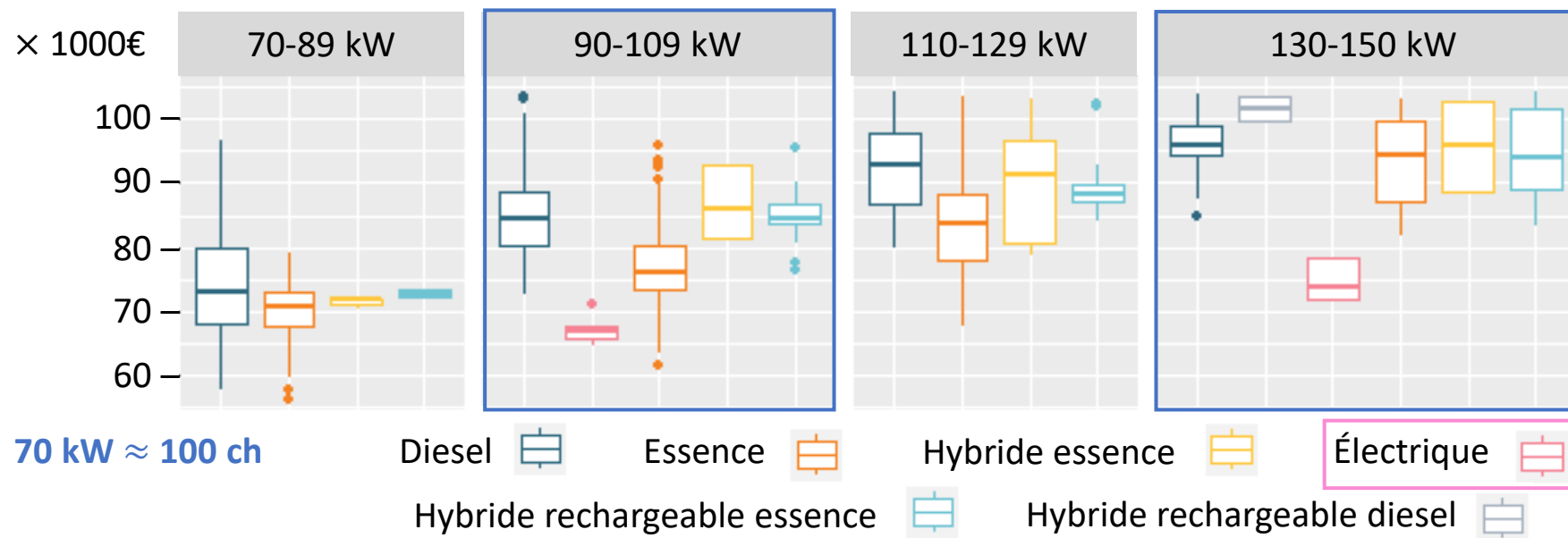


→ Nette séparation des motorisations

- Avantage plus clair des VEs parmi les « grosses cylindrées »
- Relation autonomie – prix
- Diversité de l'offre

Distribution du coût total de possession – 30000 km/an

- Distribution du TCO selon la motorisation (puissance – carburant)
 - Prise en compte du kilométrage annuel: « gros » rouleur
- Voitures privées, SUV, Wallonie, 2021



→ Motorisation électrique clairement avantageuse

- TCO: +20-25% par rapport à 15000 km/an
- Relation autonomie – prix
- Diversité de l'offre

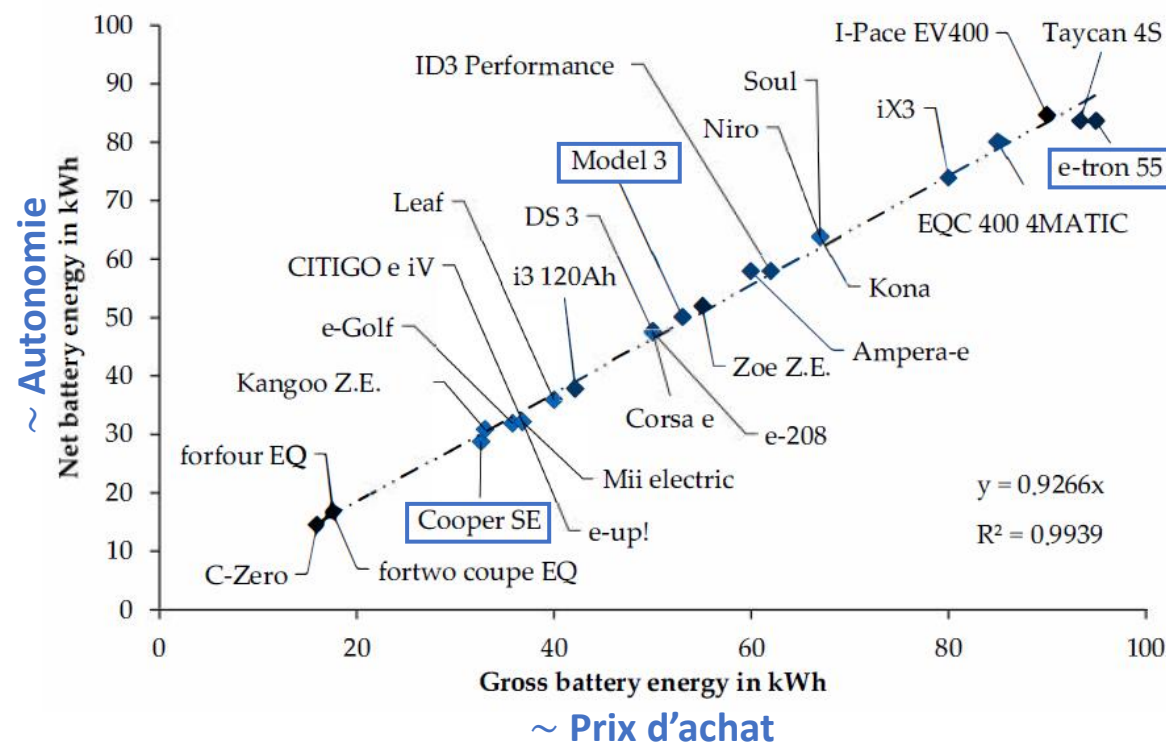
Relation autonomie – prix d’achat des VE

Modèle	Année	Ventes	Coût de la batterie
BMW i3	2014	— —	396 €/kWh
GM Bolt	2016	— —	224 €/kWh
BMW i3	2017	— —	254 €/kWh
Renault Zoe	2017	—	208 €/kWh
Tesla Model 3	2018	+	164 €/kWh
Audi e-tron	2019	+	157 €/kWh

- Diminution du coût du kWh depuis 10 ans
- Agrandissement du gabarit du VE

→ Tesla Model 3: 55 kWh

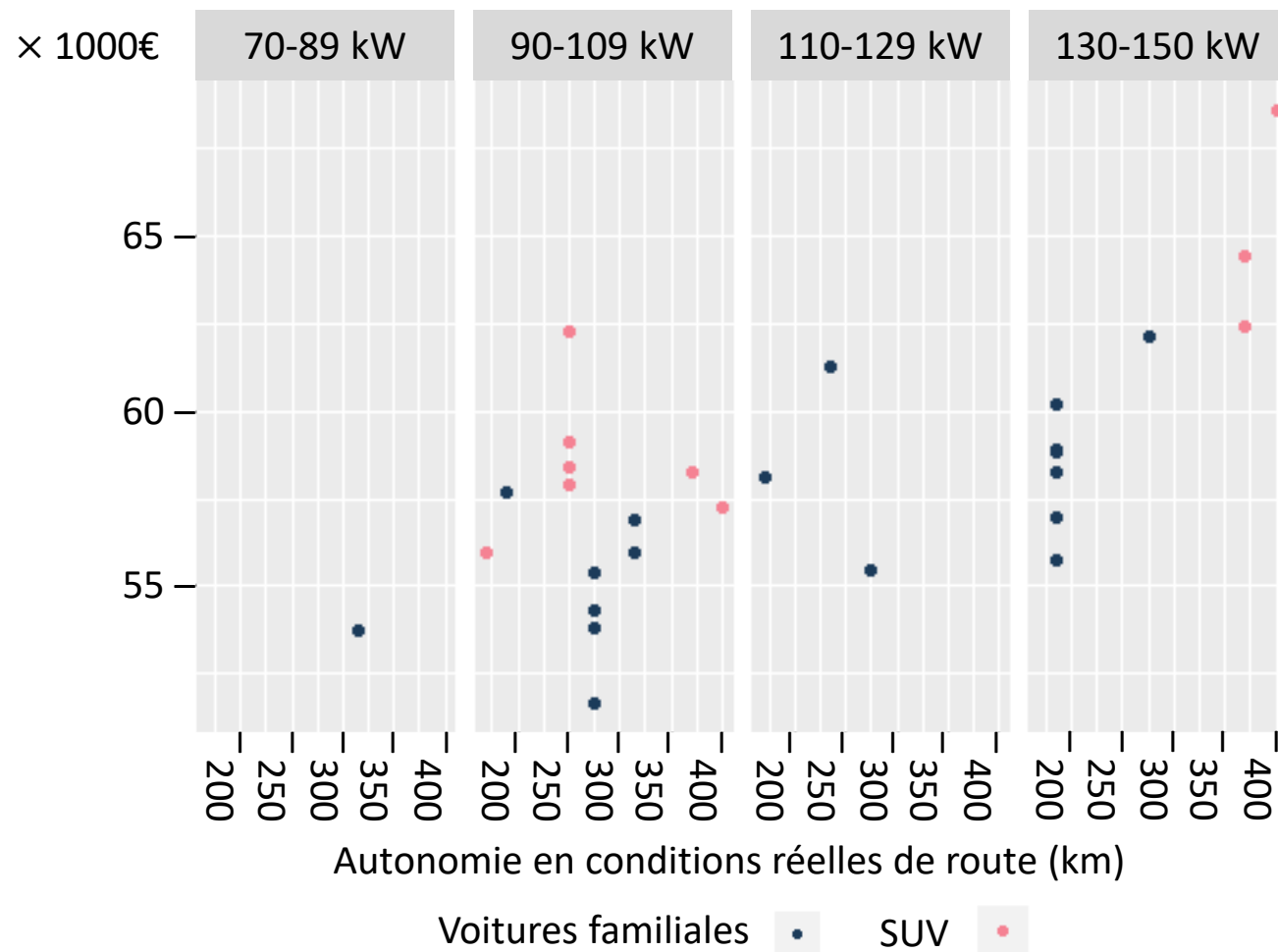
- Coût de la batterie: ~ 9000 €
- ~ 20% du prix d’achat

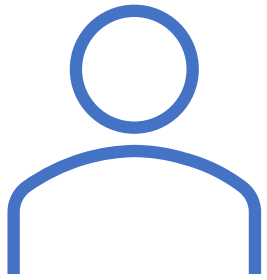


A titre indicatif, un VE consomme 15-20 kWh/100 km

Relation autonomie – TCO des VE

- La distribution du TCO en fonction de l'autonomie explique principalement l'écart interquartile pour chaque gamme de puissance en VE 
- L'autonomie des VE couvre facilement les besoins quotidiens (voire hebdomadaires)
- L'autonomie dépasse rarement les 400 km en conditions réelles
- Les voitures familiales sont généralement associées à de plus faibles coûts de possession





Relation utilisateur – véhicule électrique

Acceptation, adoption et utilisation

Relation utilisateur – véhicule électrique

- **Acceptation des VEs:** 3 barrières principales
 - *Range (anxiety)*: besoins quotidiens vs ponctuels
 - Infrastructure de recharge: en bon développement
 - Prix d'achat vs notion du TCO
- **Gestion de l'autonomie**
 - Perception d'une autonomie de réserve vs autonomie nécessaire
- **Relation avec la recharge**
 - Cf. suite
- **Techniques d'éco-conduite**
 - « Anti-gaspillage »
 - Interaction avec le tableau de bord
 - Récupération d'énergie en freinage et en descente

Expérience

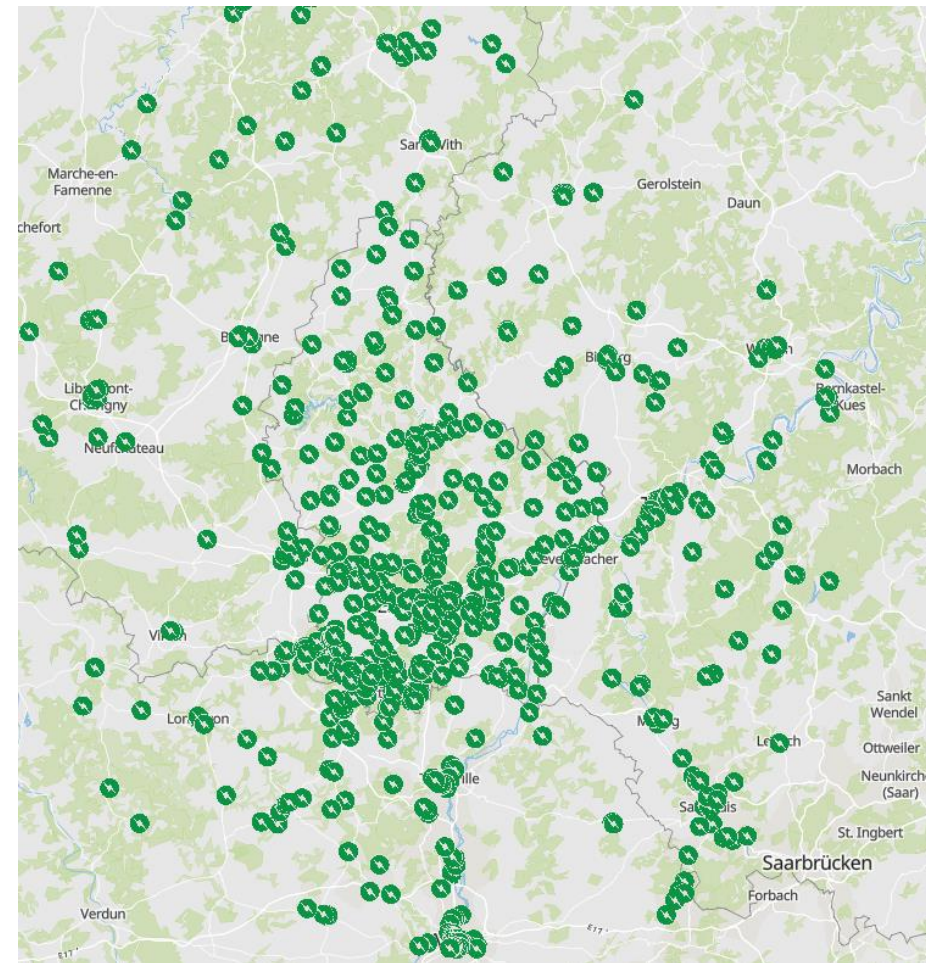
- Adaptation durant les 3 premiers mois
- Autonomie de réserve: ~ 20 km
 - Utilisation de 75-80% de l'autonomie estimée par le conducteur
 - *Range anxiety*: évitée plutôt qu'expérimentée

Gestion de la recharge au cours du trajet

- Utilisation d'outils de planification (cf. applications Chargemap, Ionity, Fastned, ...)



- Temps de charge durant les pauses habituelles
 - Recharge rapide: 80% récupérés en 30 minutes
- Valorisation du temps de recharge: restaurants, supermarchés, activités en plein air, boutique de produits locaux, expositions, etc.
- Sur la carte ci-contre: 707 bornes de recharge – 1.802 points de charge (centré au GD Lux., 2021)



Carte des bornes de recharge pour véhicules électriques en 2021 au Luxembourg

Gestion de la recharge au cours du trajet

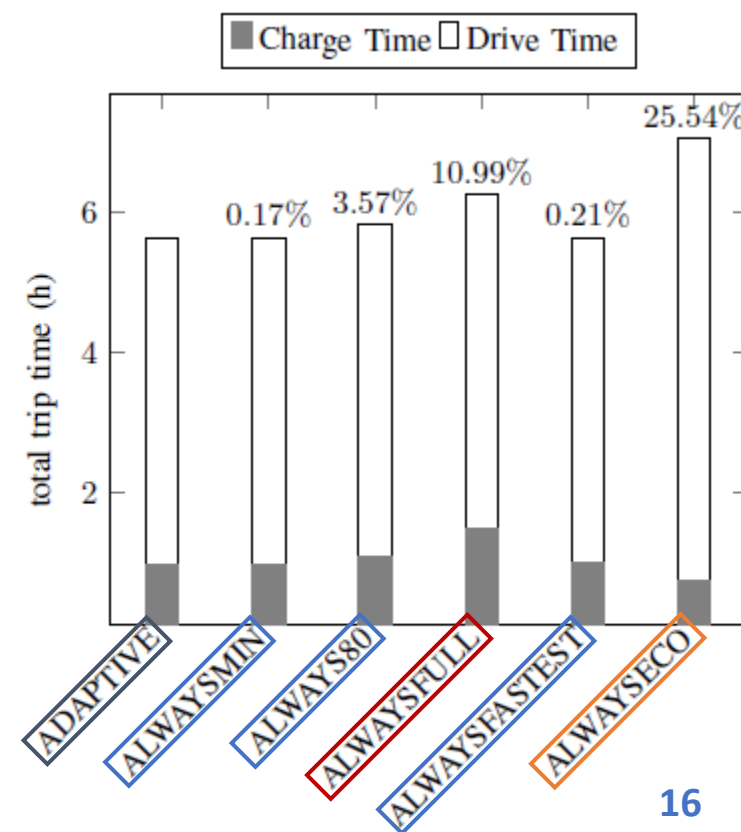
- Atteindre des très faibles et très hauts états de charge endommage la batterie sur le long terme, tout comme les recharges rapides fréquentes
- La vitesse de charge diminue significativement à partir de 80% d'état de charge
- Un état de charge de 15% est généralement considéré comme un état minimal

→ En cours de trajet, différentes stratégies peuvent s'appliquer:

- Minimisation de la quantité d'énergie rechargée,
- Minimisation du temps de recharge,
- Maximisation de l'état de charge,
- Maximisation de la puissance de recharge,
- Eco-conduite avancée/eco-routing
- Une réduction de la vitesse maximale réduit le nombre d'arrêts
- Si voyage ≥ 300 km et/ou ≤ 40 kWh :

$$\max \left(\frac{\text{Temps de charge}}{\text{Temps total de trajet}} \right) = \frac{1}{6}$$

- Si < 300 km ou > 40 kWh: ratio $\searrow$



Gestion de la recharge au cours du trajet

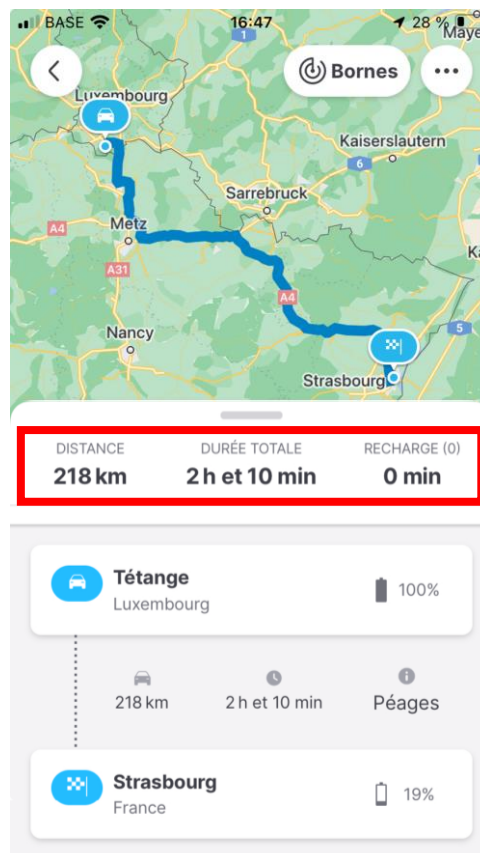
Quelques cas d'étude utilisant Chargemap...



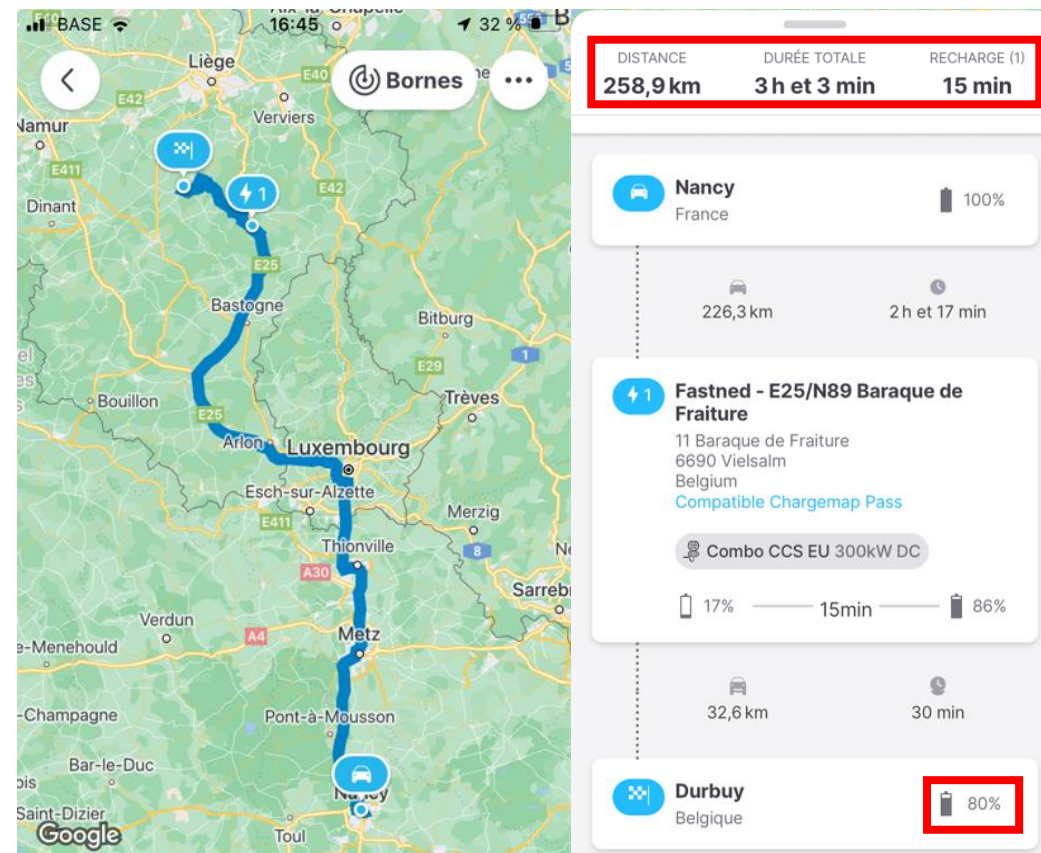
Kia EV6, 58 kWh



Tétange – Strasbourg



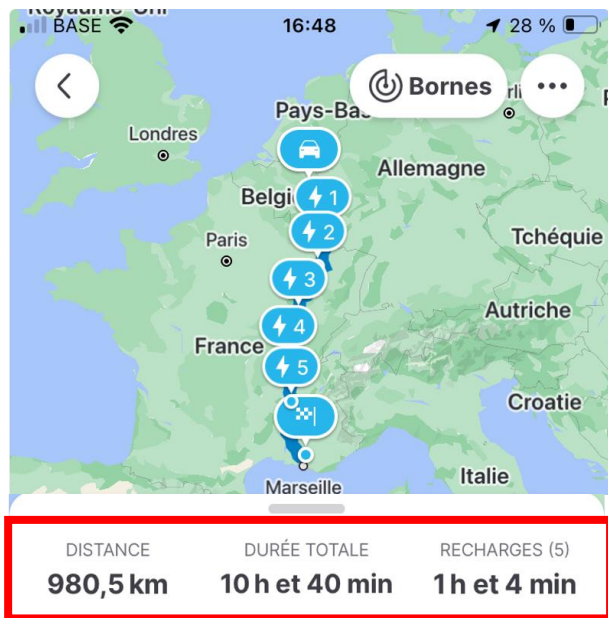
Nancy – Durbuy



Gestion de la recharge au cours du trajet

Quelques cas d'étude utilisant Chargemap ...

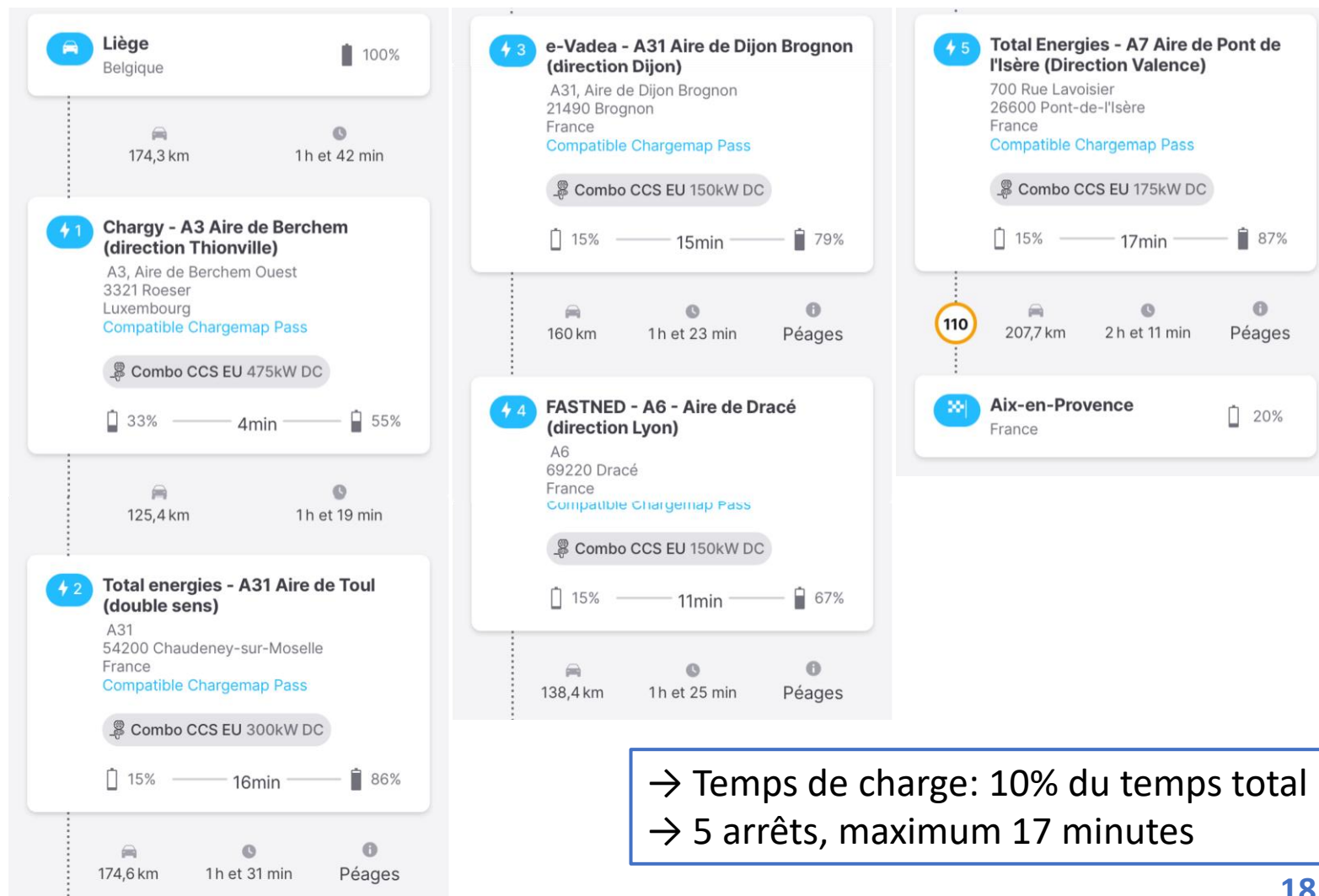
Liège – Aix-en-Provence



Kia EV6, 58 kWh



<https://fr.chargemap.com/>



→ Temps de charge: 10% du temps total
→ 5 arrêts, maximum 17 minutes



Simulations de la consommation d'énergie

Périodes hivernale et estivale

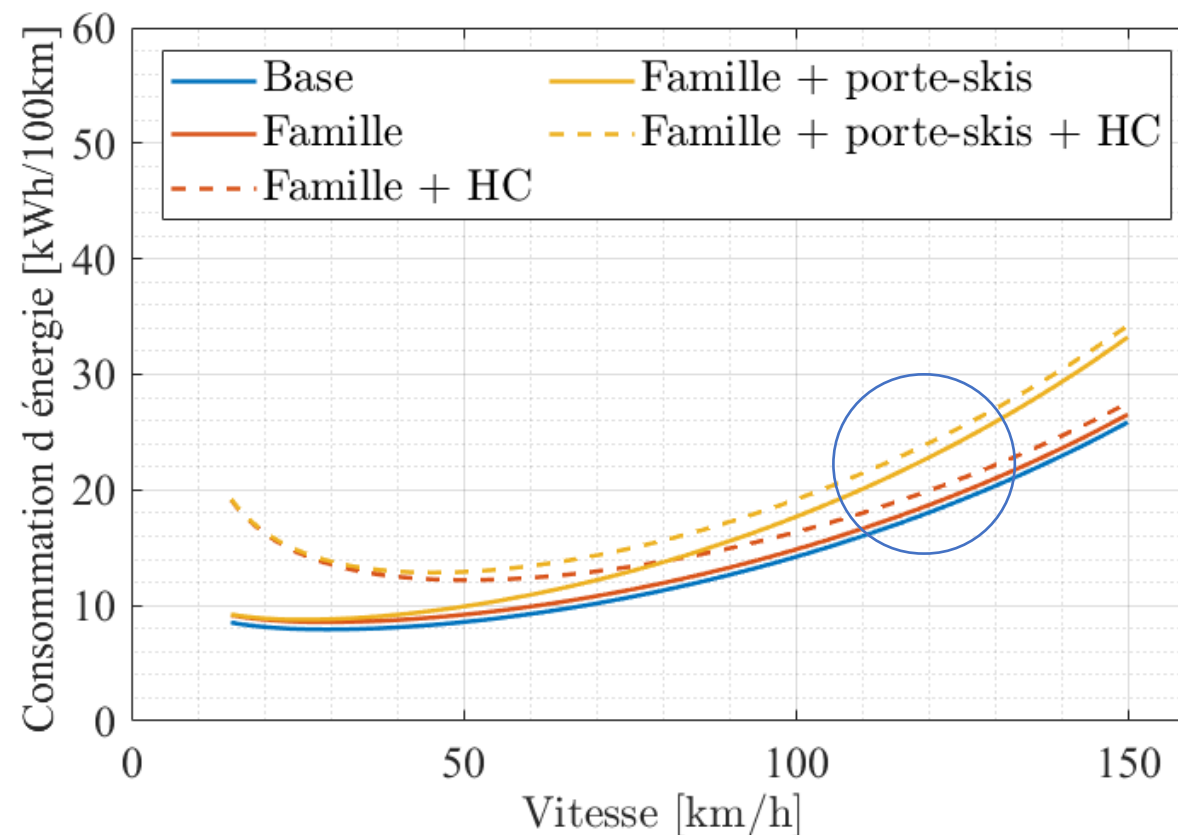
Consommation d'énergie – Période hivernale

- La consommation d'énergie peut fortement augmenter lors des trajets à vocation touristique
- Base: 1 conducteur sans bagage
- Voyage en famille: masse en charge ↗ (+ 285 kg)
- Si besoin de chauffer l'habitacle: *HC*, 1.5 kW
- Si porte-skis ou coffre de toit: trainée aérodynamique ↗ ($\times 1.33$)
- Effets similaires sur la consommation par rapport aux véhicules à moteur thermique

Autonomie sur autoroute (km) – Kia EV6, 58 kWh

Vitesse	Base	Famille + Chauffage	Famille + Skis + chauffage
130 km/h	286	262 (-8%)	215 (-25%)
110 km/h	363	322 (+23%)	271 (+26%)

(Schuetz, 2015)

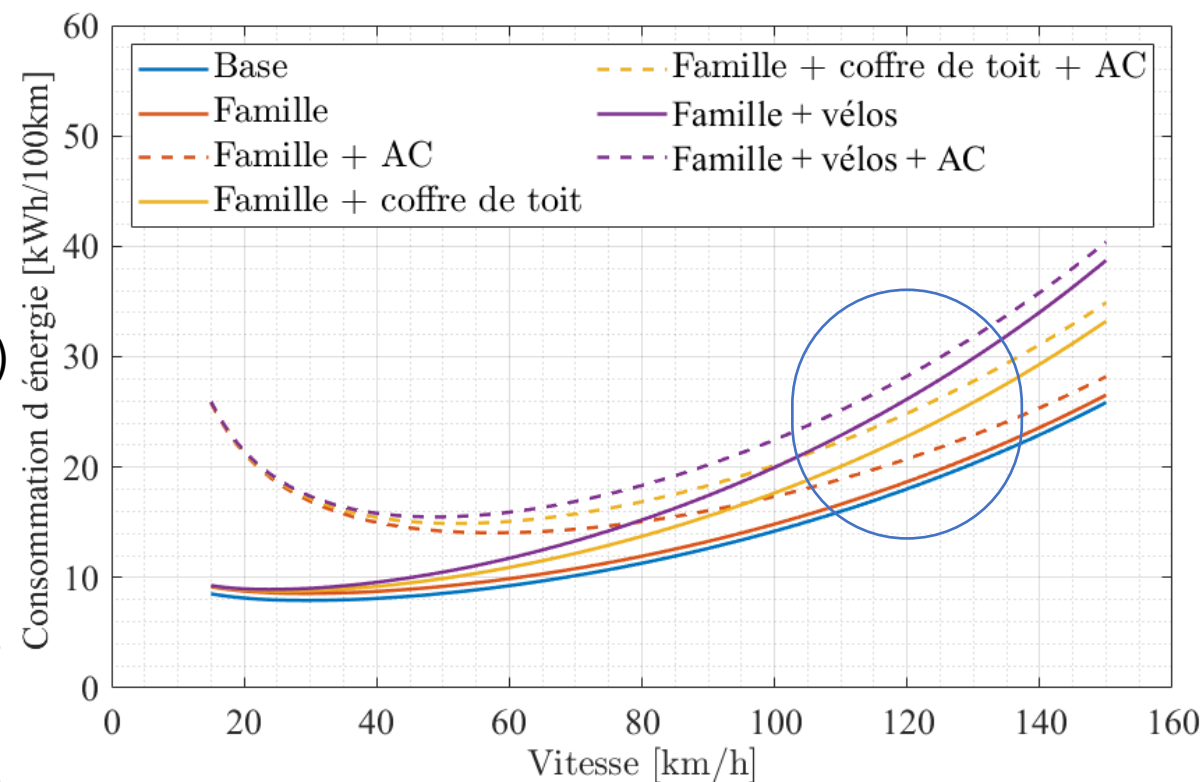


Consommation d'énergie – Période estivale (1/2)

- Base: 1 conducteur sans bagage
- Voyage en famille: masse en charge ↗ (+ 285 kg)
- Si besoin de climatiser l'habitacle: AC, 2.5 kW
- Si coffre de toit: trainée aérodynamique ↗ ($\times 1.33$)
- Si vélos sur le toit: trainée aérodynamique ↗ ($\times 1.60$)
- Effets similaires sur la consommation par rapport aux véhicules à moteur thermique

Autonomie sur autoroute (km) – Kia EV6, 58 kWh

Vitesse	Base	Famille + Coffre toit	Famille + Vélos + AirCo
130 km/h	286	224 (-22%)	182 (-36%)
110 km/h	363	289 (+29%)	230 (+26%)



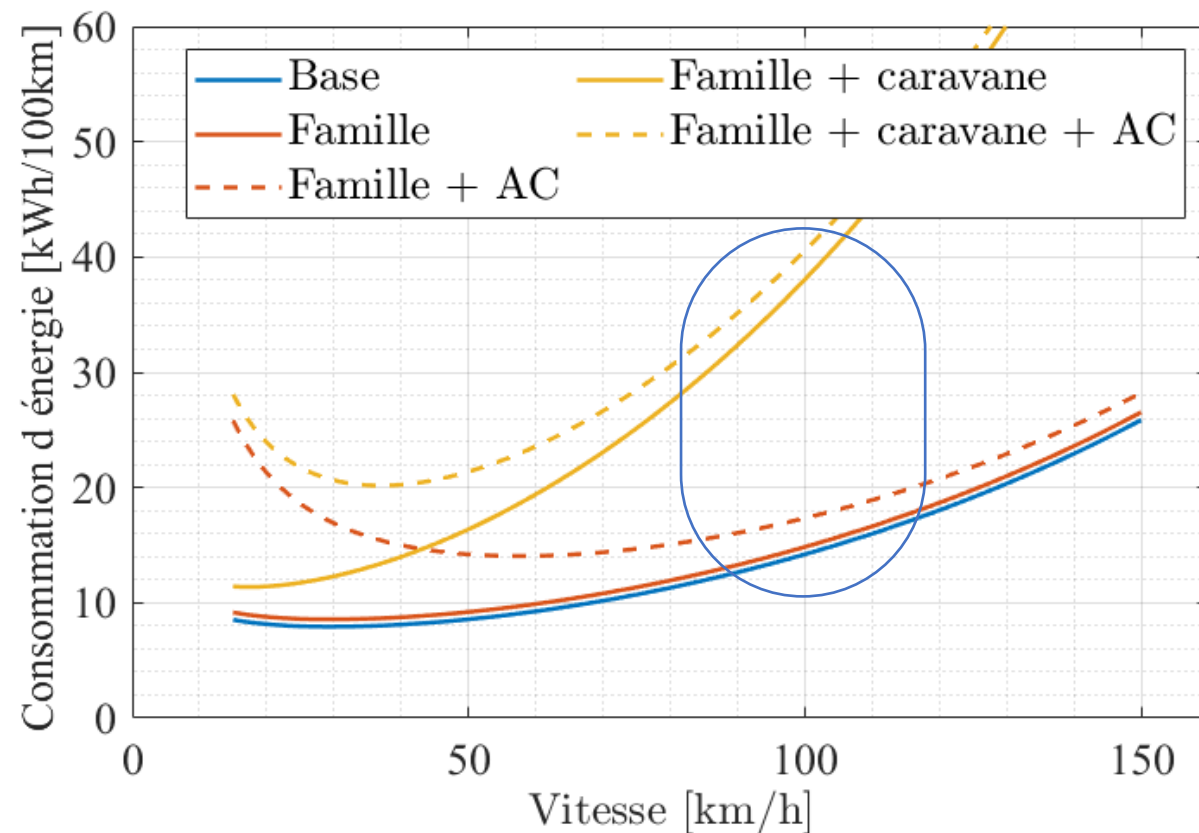
Consommation d'énergie – Période estivale (2/2)

- Base: 1 conducteur sans bagage
- Voyage en famille: masse en charge ↗ (+ 285 kg)
- Si besoin de climatiser l'habitacle: AC, 2.5 kW
- Si traction d'une caravane
 - Trainée aérodynamique ↗ ($\times 3.5$)
 - Masse ↗ (+ 750 kg)
- Effets similaires sur la consommation par rapport aux véhicules à moteur thermique

Autonomie sur autoroute (km) – Kia EV6, 58 kWh

Vitesse	Base	Famille + AirCo	Famille + AirCo + Caravane
110 km/h	363	307 (-15%)	124 (-66%)
90 km/h	460	360 (+17%)	165 (+33%)

(Schuetz, 2015)



Conclusions

① Relation autonomie de la voiture électrique vs prix d'achat

- ✓ Coût Total de Possession: indicateur plus pertinent que le prix d'achat pour évaluer la pertinence financière des VEs
 - ✓ Favorable chez les rouleurs moyens (TCO: 60 000€ sur 10 ans)
 - ✓ Nettement favorable pour les « gros rouleurs » (TCO: 75 000€ sur 10 ans)
- ✓ Relation de proportionnalité entre autonomie de la VE et coûts

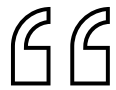
② Contraintes liées aux VEs en vue des longs déplacements à vocation touristique

- ✓ La relation utilisateur – VE est proche de l'optimal après les 3 premiers mois
- ✓ Gestion de la recharge
 - ✓ Outils de planification à disposition
 - ✓ Stratégie de recharge jusqu'à 80% sur borne rapide: temps de charge $\leq 1/6$ du temps de trajet total
- ✓ Augmentation de la consommation d'énergie en voyage
 - ✓ En hiver: jusqu'à -25% d'autonomie
 - ✓ En été: jusqu'à -36% d'autonomie voire -66% avec une caravane
 - ✓ Effets similaires sur la consommation par rapport aux véhicules à moteur thermique
 - ✓ Réduction de la vitesse de croisière

Bibliographie

- Chargemap, (sans date). *Chargemap*. [Consulté le 5 décembre 2023]. Disponible sur : <https://fr.chargemap.com/>.
- Cox, B., Bauer, C., Mendoza Beltran, A., Van Vuuren, D.P. et Mutel, C.L. (2020) 'Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios', *Applied Energy*, 269, p. 115021. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115021>.
- Franckx, L. (2023) 'Total cost of ownership of car powertrains in Belgium'.
- Franke, T. et Krems, J.F. (2013) 'Interacting with limited mobility resources: Psychological range levels in electric vehicle use', *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 48, pp. 109–122. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.tra.2012.10.010>.
- Franke, T., Schmalfuss, F. et Rauh, N. (2018). Human Factors and Ergonomics in the Individual Adoption and Use of Electric Vehicles. Dans : Thatcher, A. et Yeow, P.H.P., dir. *Ergonomics and Human Factors for a Sustainable Future*. Singapore: Springer Singapore. p. 135–160.
- Franzò, S., Nasca, A. et Chiesa, V. (2022) 'Factors affecting cost competitiveness of electric vehicles against alternative powertrains: A total cost of ownership-based assessment in the Italian market', *Journal of Cleaner Production*, 363, p. 132559. Disponible sur <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132559>.
- König, A., Nicoletti, L., Schröder, D., Wolff, S., Waclaw, A. et Lienkamp, M. (2021) 'An Overview of Parameter and Cost for Battery Electric Vehicles', *World Electric Vehicle Journal*, 12(1), p. 21. Disponible sur : <https://doi.org/10.3390/wevj12010021>.
- Rauh, N., Franke, T. et Krems, J.F. (2015) 'Understanding the Impact of Electric Vehicle Driving Experience on Range Anxiety', *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 57(1), pp. 177–187. Disponible sur : <https://doi.org/10.1177/0018720814546372>.
- Schoenberg, S. et Dressler, F. (2019) 'Planning Ahead for EV: Total Travel Time Optimization for Electric Vehicles', in *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*. 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference - ITSC, Auckland, New Zealand: IEEE, pp. 3068–3075. Disponible sur : <https://doi.org/10.1109/ITSC.2019.8917335>.
- Schuetz, T.C. (2015) *Aerodynamics of Road Vehicles, Fifth Edition*. Warrendale, PA: SAE International. Disponible sur : <https://doi.org/10.4271/r-430>.
- Système d'Information Géographique de la Grande Région, (2021). Bornes de recharge pour véhicules électriques 2021 [en ligne]. SIG-GR. [Consulté le 05 décembre 2023]. Disponible sur : https://www.sig-gr.eu/fr/cartes-thematiques/transports/Bornes_recharge/2021.html.

Merci pour votre attention!



Ideally, people may come to view EVs not as short-range combustion vehicles but as a new, distinct mode of transportation.



cité dans Franke, T. et Krems, J.F. (2013)

