

Flexibilité du véhicule électrique – opportunité pour le réseau ou nouveau défi ?

Ziad Balbzioui, Anna Bergounoux-Santini, Nicolas Demore,
Loris Lepage, Jules Richard

Introduction

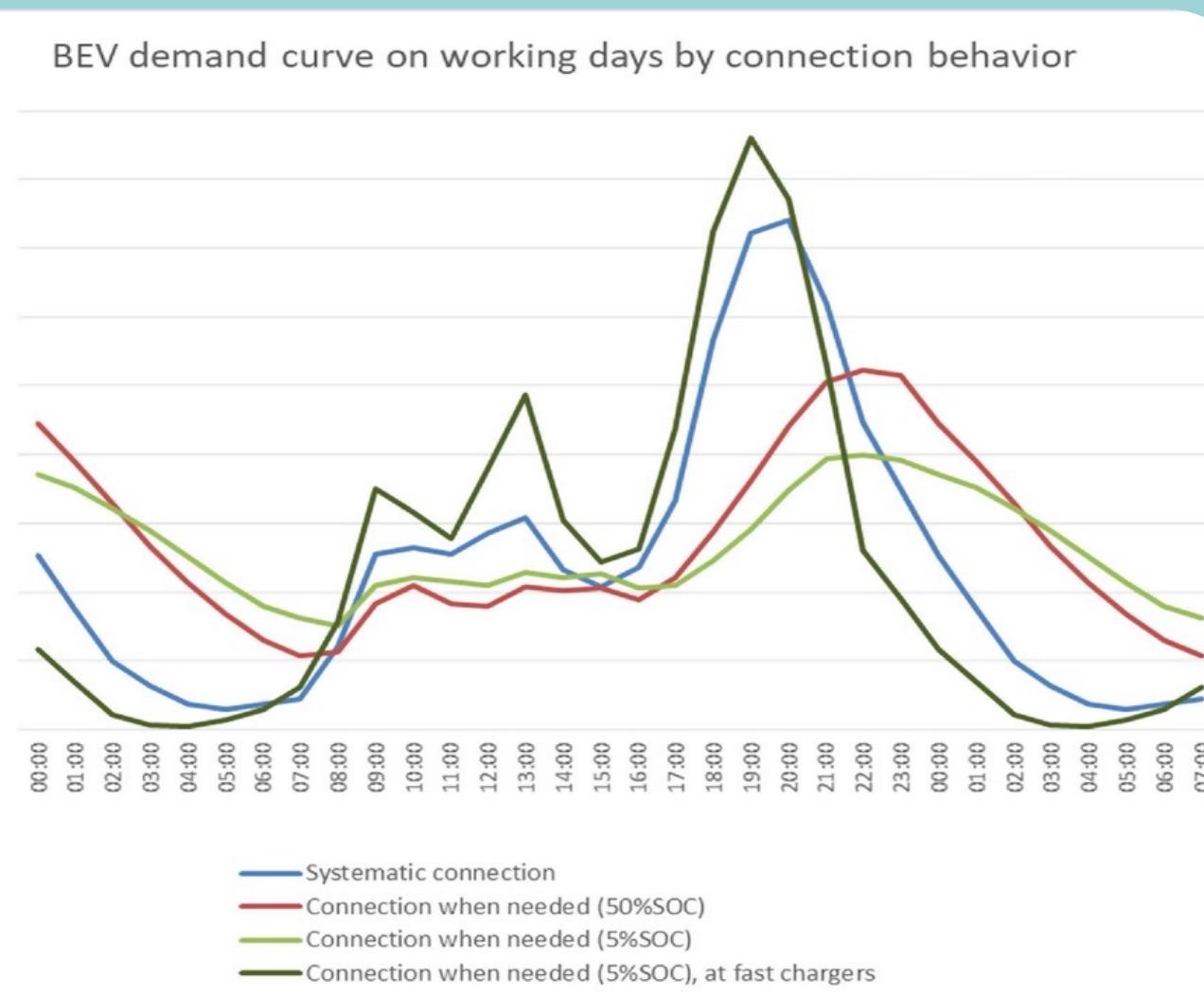
Le développement rapide du véhicule électrique modifie les équilibres du système électrique en **augmentant la demande** et en **accentuant les contraintes sur le réseau**. Cependant, grâce à la flexibilité de la recharge et au potentiel de pilotage des batteries, le véhicule électrique peut également contribuer à l'équilibrage du réseau. La mobilisation de cette flexibilité constitue ainsi un enjeu central pour faire du véhicule électrique une opportunité plutôt qu'un nouveau défi pour le réseau électrique.

Aujourd'hui, la majorité des véhicules électriques sont connectés au réseau aux mêmes instants, c'est-à-dire proche de 9H et de 19h, engendrant des pics de consommation. Il devient alors nécessaire de répartir cette consommation sur l'ensemble de la journée pour éviter une « surcharge du réseau ». Cependant, l'augmentation de la proportion de véhicule électrique dans la parc automobile pose des questions sur la capacité à fournir assez d'énergie pour les alimenter.

Le graphe [1] illustre les pics de demande pour la recharge.

Flexibilité – définition

Flexibilité : capacité à moduler la puissance injectée ou soutirée sur le réseau que l'on nomme la flexibilité électrique. Du côté de la consommation, la flexibilité se traduit par la **capacité de décaler les moments où l'on consomme de l'électricité**.



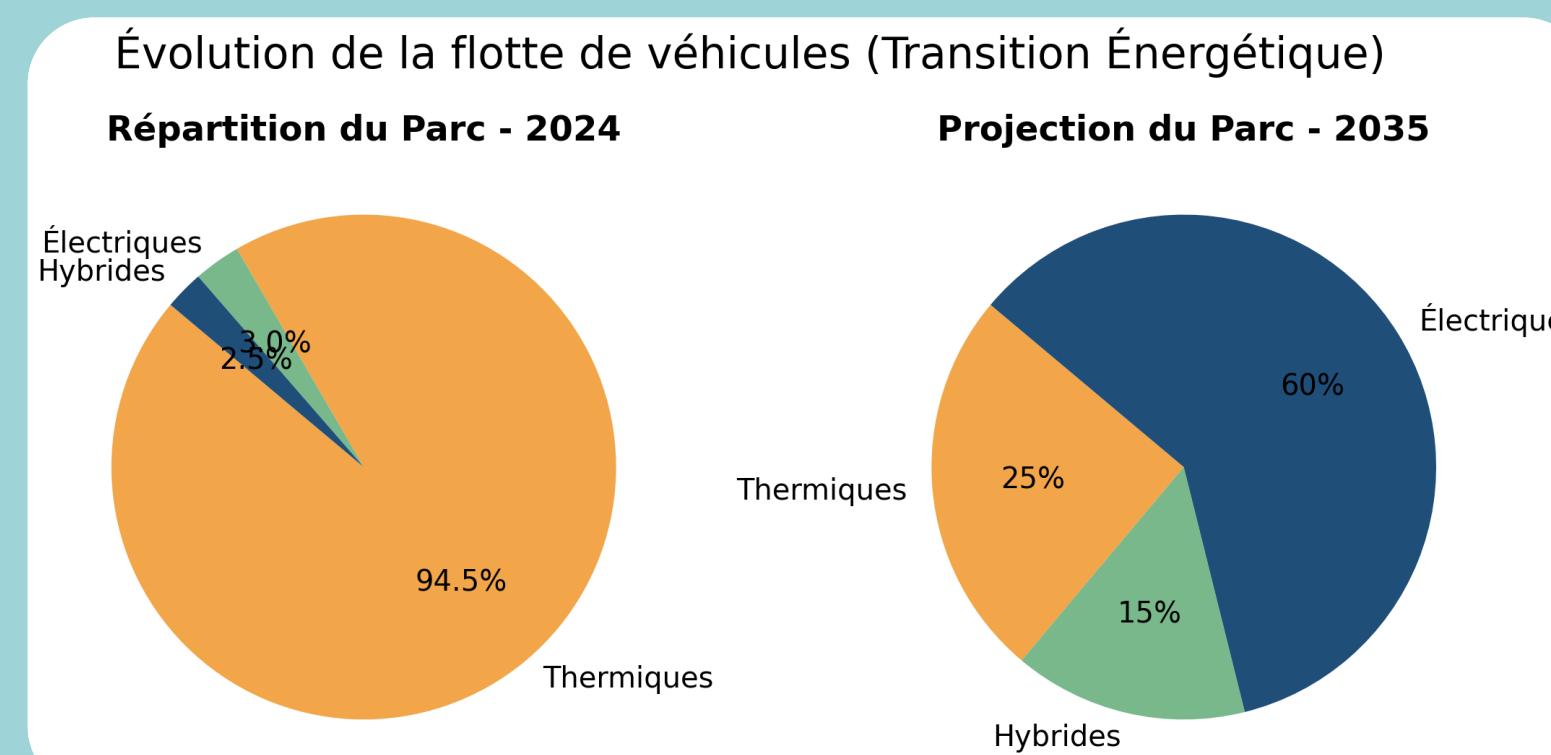
Cas de la métropole de Lyon

Afin de mieux se représenter les enjeux liés à l'électrification, intéressons-nous à la **Métropole de Lyon**. Deuxième pôle urbain de France, elle se caractérise par une forte densité de population, une mobilité quotidienne intense et des ambitions climatiques affirmées, notamment en matière de décarbonation des transports. L'électrification massive des véhicules y apparaît donc à la fois réaliste et stratégique.

Dans ce contexte, Lyon offre un cas d'étude représentatif des métropoles européennes, où l'essor du véhicule électrique peut devenir soit un levier de flexibilité pour le réseau, soit un nouveau défi en termes de gestion des pics de consommation.

La courbe agrégée de consommation d'énergie de la ville de Lyon est obtenue à partir données publiées par RTE pour l'ensemble de la France hexagonale [2]. On multiplie par un facteur numérique α pour obtenir la capacité maximale du réseau. On estime ici que chaque Français consomme plus ou moins la **même quantité d'énergie** chaque jour **sans décalage temporel**.

$$E_{\text{Lyon,max}} \approx \alpha \cdot E_{\text{Lyon,hiver}} \text{ avec } \alpha = 1.1$$



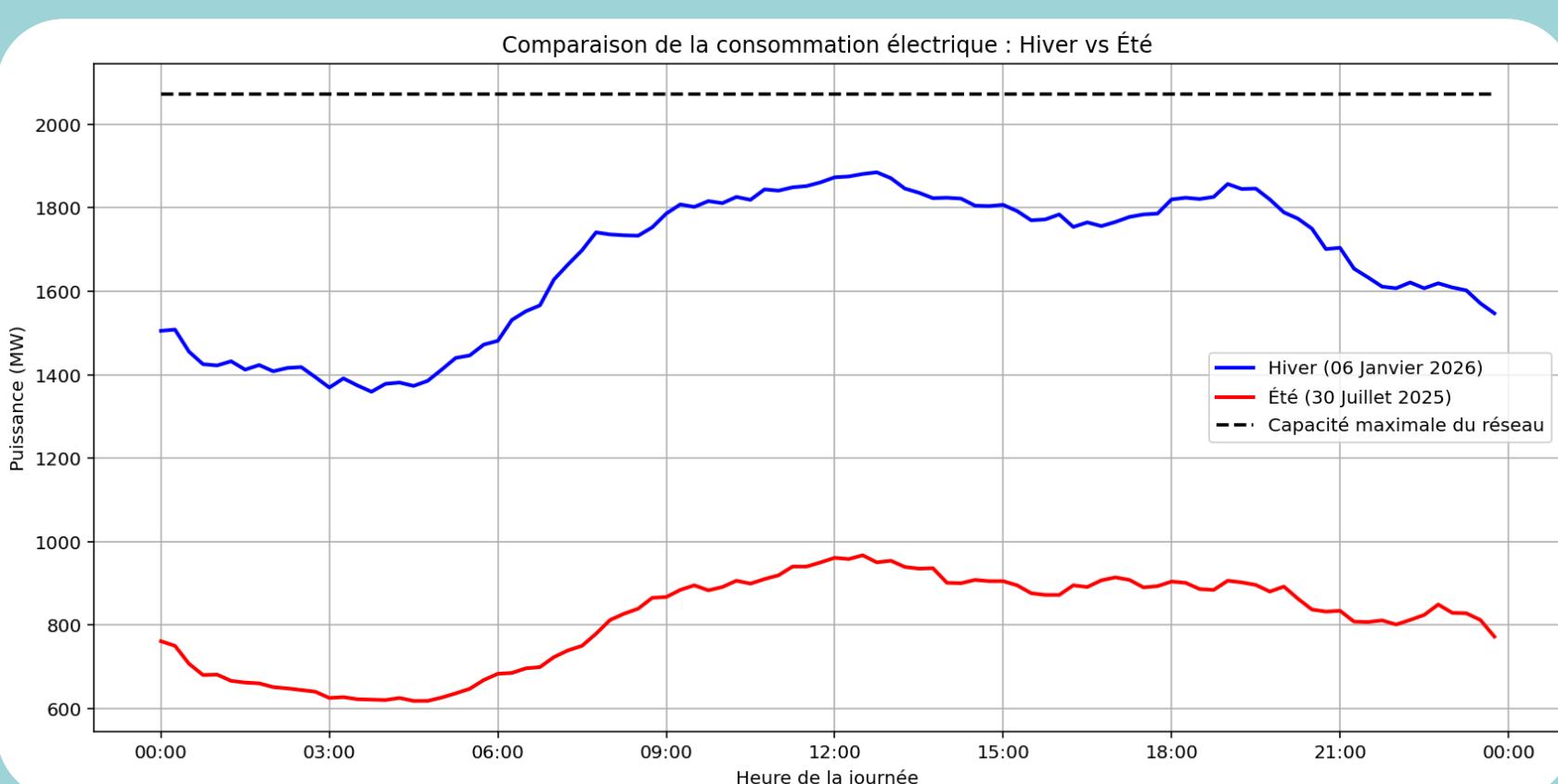
Scénario et hypothèses

Aujourd'hui :

- Population de **1.4 million d'habitants**
- Près de **600 000 véhicules** circulant dans la métropole, **380 000** dans la Zone à Faible Émission (ZFE)
- Taux de pénétration de **4%**, correspondant à la proportion de véhicule électrique en circulation
- 33 000 véhicules électrifiés**, parmi lesquels **18 000 véhicules électriques** et **15 000 véhicules hybrides** [3]

À l'horizon 2035 :

- Population de **1.7 millions d'habitants**
- Parc automobile de même taille
- Taux de pénétration envisagé : **25%, 40%, 60% et 80%**
- Chaque véhicule électrique fournit **6 kW** lorsqu'il alimente le réseau, et reçoit **entre 6 et 20 kWh** chaque jour. En moyenne, un véhicule réalise **45 km par jour** pour une consommation de **17 kWh/100 km**. On trouve donc une alimentation de **8 kWh environ**.

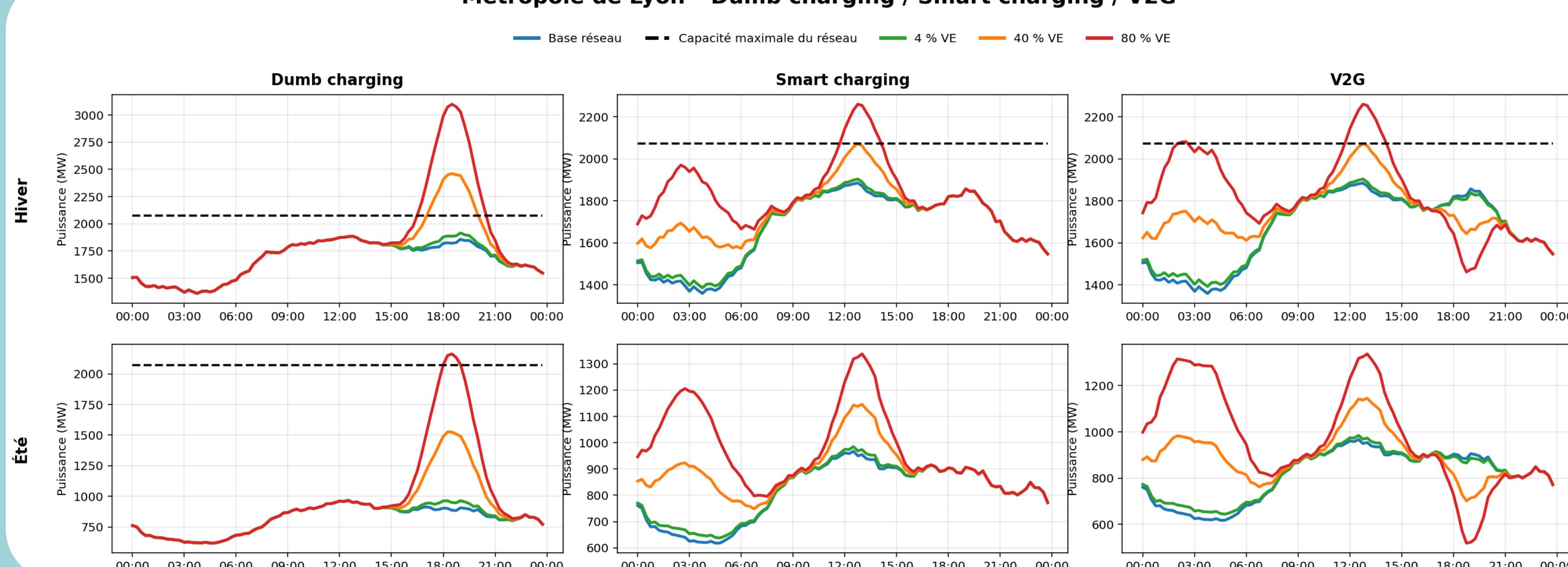


Vehicle-To-Grid – V2G

Les six graphes présents ci-dessous permettent de comparer à la fois les trois moyens de recharger un véhicule électrique et de comparer l'impact de la charge en fonction des saisons. On remarque ici que le « *Dumb Charging* » impose un pic de recharge centré autour de 18h30. Le « *Smart Charging* » permet alors de répartir cette charge et par conséquent d'éliminer le pic du soir.

Quant à lui, le concept de **V2G** impose à une certaine proportion de véhicules électriques de fournir de l'énergie au réseau. C'est pourquoi plus le taux de pénétration est élevé, plus le pic du soir est faible. En été, comme en hiver ce pic de consommation observable sur la courbe agrégée devient un creux pour un taux de pénétration supérieur à 40%. La capacité maximale actuelle du réseau ne permet pas de répondre aux besoins de recharge, peu importe la stratégie, pour un grand taux de pénétration.

Métropole de Lyon – Dumb charging / Smart charging / V2G



Bibliographie :

- [1] : Integration of electric vehicles into transmission grids: A case study on generation adequacy in Europe in 2040, R. Lauvergne, Y. Perez, M. Françon, A. T. De La Cruz, Applied Energy 326 (2022)
- [2] Site de l'ODRE, OpenData Réseaux-Energies
- [3] : Le Grand Lyon, site officiel de la Métropole de Lyon
- [4] : Clustering of Electric Vehicle Charging Behaviors Using Gaussian Mixture Models for Optimized Load Profiling, M. Saklani, 2025 IEEE 5th International Conference in Power Engineering Applications (ICPEA)

Smart Charging et V2G – concepts

Le **Smart Charging** est une stratégie qui vise à répartir l'ensemble de la charge des véhicules électriques sur une journée complète pour éviter une surcharge du réseau. Au lieu d'être branché uniquement à 9h et à 19h, les véhicules se rechargent également pendant la journée et la nuit.

Le système **V2G**, ou **Vehicle-To-Grid**, implique une charge bidirectionnelle : les véhicules électriques se chargent aux moments opportuns en appliquant une stratégie similaire au **Smart Charging**, mais agissent également comme des fournisseurs de flexibilité en distribuant de l'énergie stockée dans leurs batteries.

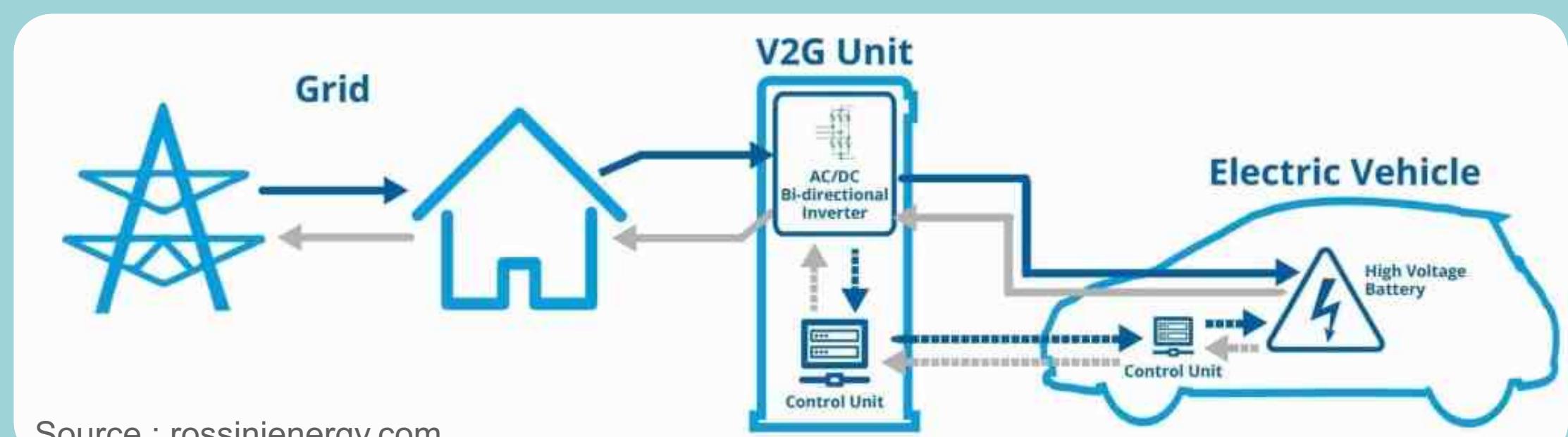


Schéma illustratif du fonctionnement du système Vehicle-To-Grid

Smart Charging

Le comportement aléatoire des charges peut être représenté par une loi normale [4]. On utilise alors de gaussiennes pour modéliser les pics de charges. Une telle fonction nous permet à la fois de choisir l'heure à laquelle on charge et la largeur du pic. En normalisant la fonction, on ne modifie pas la hauteur du pic, on répartit uniquement l'énergie sur une plage de temps choisie.

Soit $p(t, \mu, \sigma)$, la fonction gaussienne du temps normalisé, de moyenne μ et d'écart type σ :

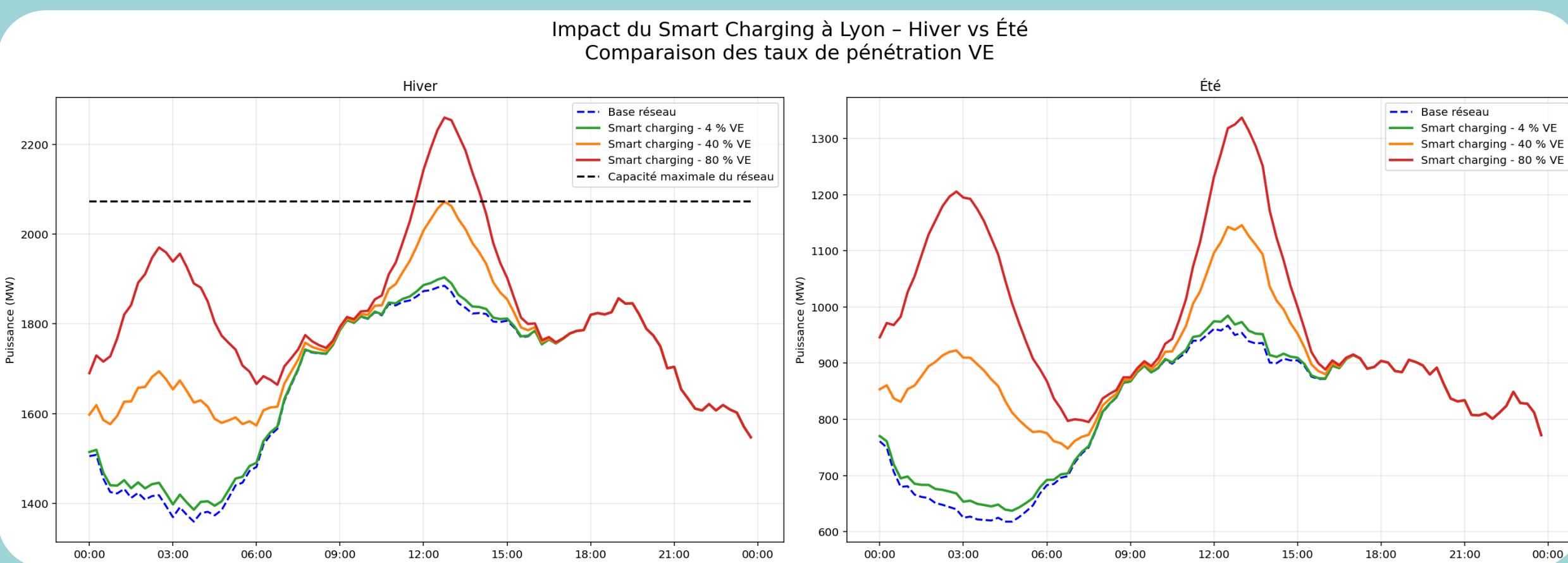
$$p(t, \mu, \sigma) = \frac{\exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}{\int \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dt}$$

Donc, on obtient les expressions de « *Dumb Charging* » et de « *Smart Charging* » suivantes :

$$P_{\text{Dumb}} = E_{\text{tot}} \cdot p(t, \mu_{\text{soir}}, \sigma_{\text{soir}})$$

et

$$P_{\text{Smart}} = E_{\text{tot}} \cdot (0.7 \cdot p(t, \mu_{\text{matin}}, \sigma_{\text{matin}}) + 0.3 \cdot p(t, \mu_{\text{soir}}, \sigma_{\text{soir}}))$$



Le « *Smart Charging* » permet bien de **répartir la charge sur l'ensemble de la journée**. En effet, on remarque l'apparition d'un pic pendant la nuit ainsi qu'un élargissement du pic, correspondant à la charge des véhicules à 13h. On trouve toujours une certaine contrainte sur le réseau car la demande des véhicules augmente avec leur nombre.

Conclusion

Le déploiement du véhicule électrique constitue autant une opportunité qu'un défi pour le système électrique local. Le « *Smart Charging* » apparaît comme un levier immédiatement mobilisable et réaliste : en pilotant les recharges aux heures creuses, il permet de **lisser les pics de demande**, de **soulager le réseau**, tout en **conservant le confort** d'usage pour les usagers.

À l'inverse, le **V2G**, bien que prometteur sur le papier, demeure aujourd'hui utopique à court terme. Les freins techniques, économiques et réglementaires, ainsi que les interrogations sur l'usure des batteries et l'acceptabilité sociale, rendent son déploiement massif encore très incertain. Il n'est bénéfique que pour de faible taux de pénétration.

Limites

- Les hypothèses simplificatrices réalisées
- Les modèles utilisés
- Aucunes études réalisées sur l'évolution des sources d'énergies

Que faire ?

- Utiliser des énergies renouvelables (solaires ...) pour palier aux besoins énergétiques
- Installer des bornes intelligentes dans l'espace public et les parkings d'entreprises
- Accompagner les usagers par information, aides financières et pilotage simplifié de la recharge, généraliser le « *Smart Charging* » via incitations tarifaires locales

