

Impact de la Généralisation du Véhicule Électrique sur la Courbe de Charge et l'Intégration des Énergies Renouvelables



Félix Saudemont

PRI 2025-2026

5A DAE / Option RESEAU

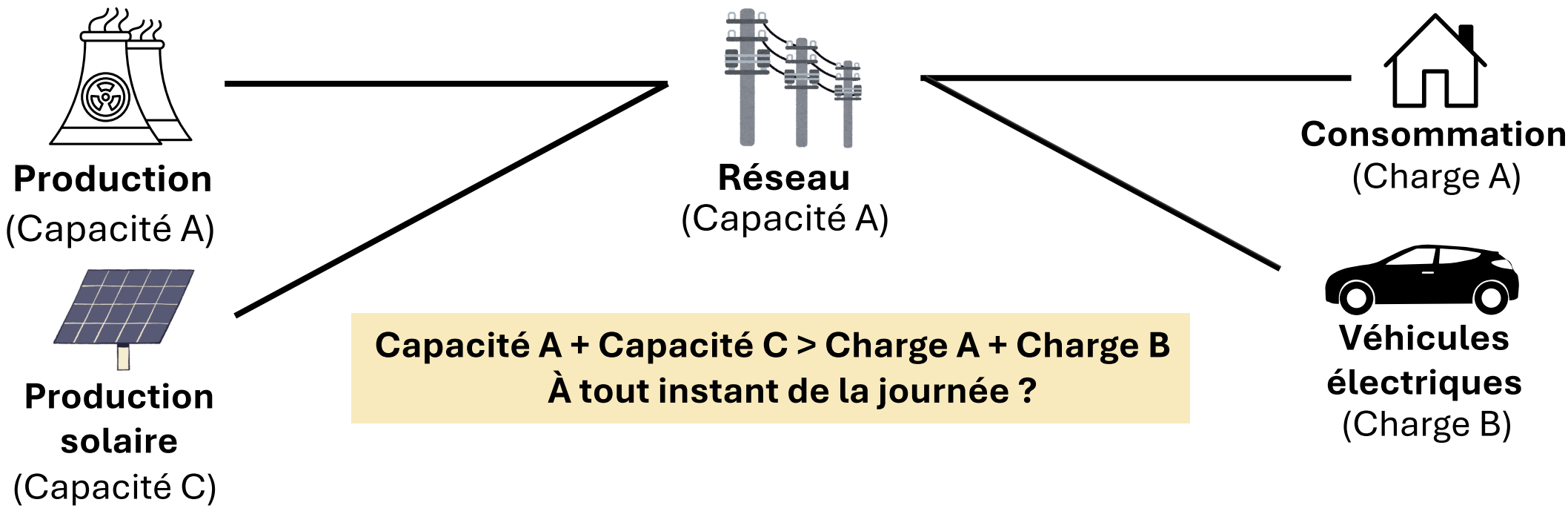
Sous la direction de Mindjid Maizia

Hypothèse : La généralisation du véhicule électrique contribuera à lisser la courbe de charge de la consommation d'électricité et à intégrer totalement les énergies renouvelables, notamment solaires

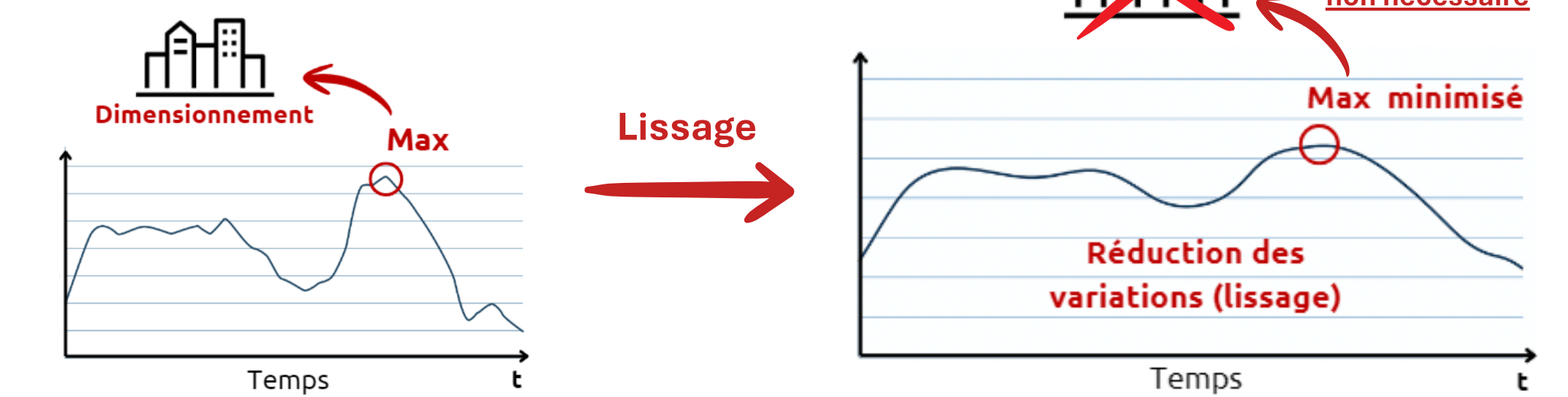
Enjeux

La généralisation des véhicules électriques (VE) soulève des enjeux techniques, économiques et environnementaux majeurs impliquant gestionnaires de réseaux, producteurs d'énergie, et consommateurs.

La question des **infrastructures** est l'un des principaux enjeux mentionnés par la littérature scientifique, notamment la nécessité de redimensionner les centrales de production et le réseau électrique pour absorber une hausse de charge, possiblement liée à l'intégration de VE. Ce problème est l'enjeu principal de ce PRI et se présente de la manière suivante :



Si oui, alors le lissage se présentera de cette manière :

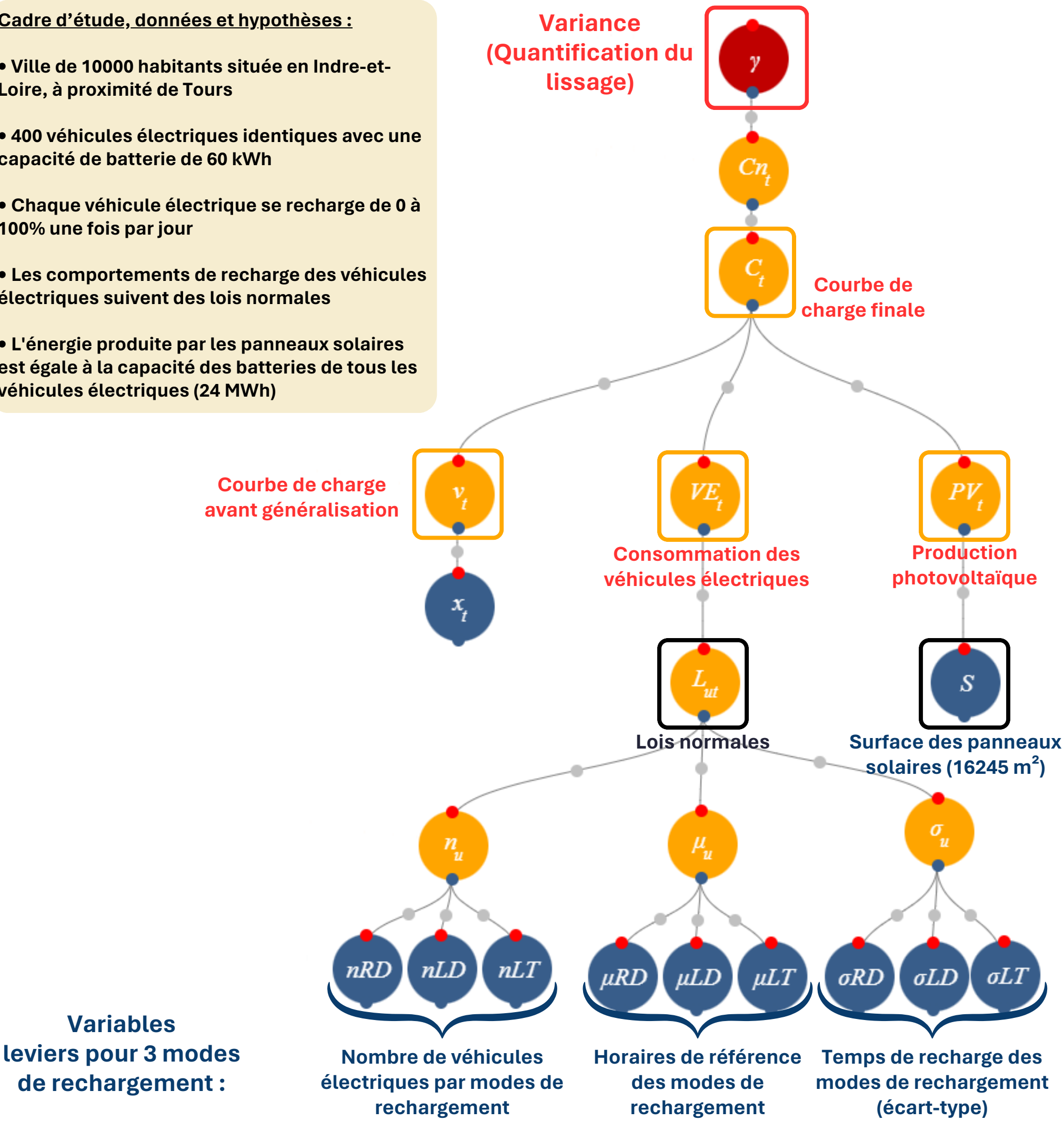


On se pose alors la question suivante : La généralisation du véhicule électrique contribuera-t-elle à lisser la courbe de charge de la consommation d'électricité et à intégrer totalement les énergies renouvelables, notamment solaires, dans le réseau électrique local ?

Méthodologie : Modélisation de la généralisation des véhicules électriques et de la mise en place d'énergies renouvelables

Cadre d'étude, données et hypothèses :

- Ville de 10000 habitants située en Indre-et-Loire, à proximité de Tours
- 400 véhicules électriques identiques avec une capacité de batterie de 60 kWh
- Chaque véhicule électrique se recharge de 0 à 100% une fois par jour
- Les comportements de recharge des véhicules électriques suivent des lois normales
- L'énergie produite par les panneaux solaires est égale à la capacité des batteries de tous les véhicules électriques (24 MWh)



État de l'art

À partir de trois bibliographies abordant chacune une approche différente de l'intégration du véhicule électrique pour lisser la courbe de charge, nous avons réalisé un état de l'art permettant de les comparer. Cet état de l'art peut être synthétisé sous la forme du tableau suivant :

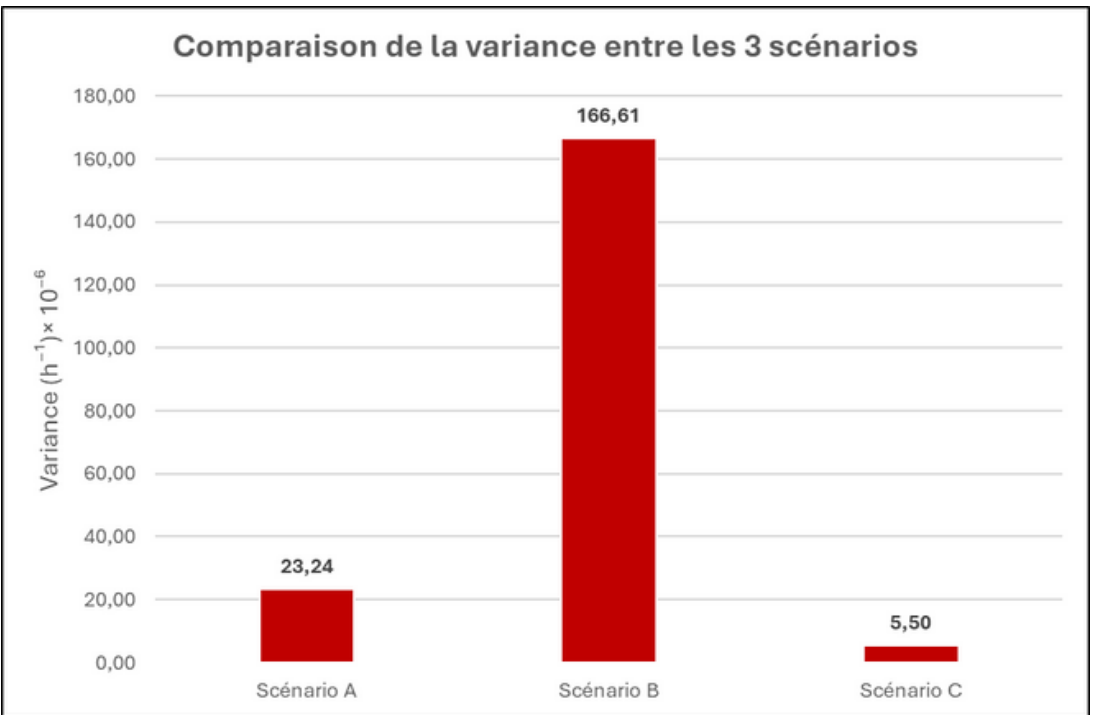
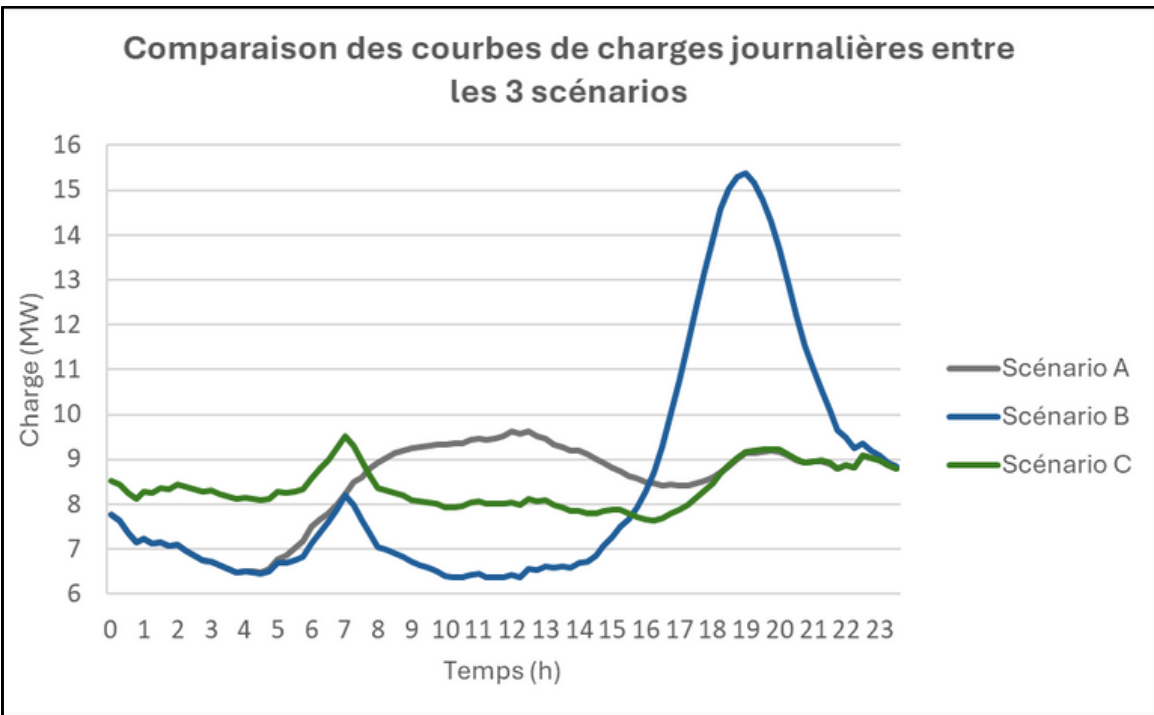
Auteur	(Needell et al. (2023))	(Van Krieking et al. (2021))	(Kucevic et al. (2021))
Intégration des énergies renouvelables ?	Oui, intégration d'une production photovoltaïque	Oui, intégration d'une production photovoltaïque	Non
Méthode de modélisation	• Charge + ENR : Données historiques • VE : Flotte de VE à Dallas et New York (modèle TripEnergy52)	• Charge + ENR + VE : Modèle de contrôle prédictif (MPC) utilisant des réseaux neuronaux récurrents avec des données en temps réel et historiques	• Charge + ENR + VE : Outil de simulation open source
Méthode d'intégration des véhicules électriques	• Recharge nocturne programmée à domicile • Déplacement de la recharge du domicile vers le lieu de travail (Stratégies Low-Tech)	• Charge bidirectionnelle des véhicules électriques (Stratégie High-Tech)	• Systèmes de stockage d'énergie par batteries (BESS) (Stratégie High-Tech)
Méthode de contrôle du lissage de la courbe de charge	Histogrammes pour comptabiliser la fréquence des pics de charge	Simple comparaison avant/après des courbes de charge	Graphiques de contour et surfaces 3D
Critique	→ Peu dynamique avec des données historiques → Intégration partielle des ENR en cas de surproduction → Faible réactivité face aux événements exceptionnels → N'intègre pas la variance dans le contrôle du lissage, qui permet de le quantifier clairement	→ Ne facilite pas directement l'intégration des ENR → Risque de compromettre l'usage des utilisateurs lors des événements exceptionnels	→ L'article ignore les ENR → Les batteries corrigent les limites des autres auteurs, mais au prix d'un rendement dégradé et d'un lissage de charge peu pertinent

À partir de cet état de l'art (parties en rouge du tableau), notre méthode sera la suivante :

- Modélisation de la charge et des ENR à partir de données historiques et des VE à partir d'hypothèses
- Création de scénarios de décalage des recharges : recharges rapides le soir à domicile déplacées au midi au travail, et recharges lentes la nuit à domicile
- Contrôle du lissage en comparant les courbes de charge et les variances avant et après intégration.

Scénarios, résultats et limites

- Scénario A : Aucun véhicule électrique et aucun panneau photovoltaïque
- Scénario B : Tous les véhicules se rechargent de manière rapide, en rentrant le soir à domicile (RD)
- Scénario C : La moitié des véhicules électriques se recharge de manière lente à midi sur le lieu de travail (LT), et l'autre moitié se recharge de manière lente, la nuit à domicile (LD)



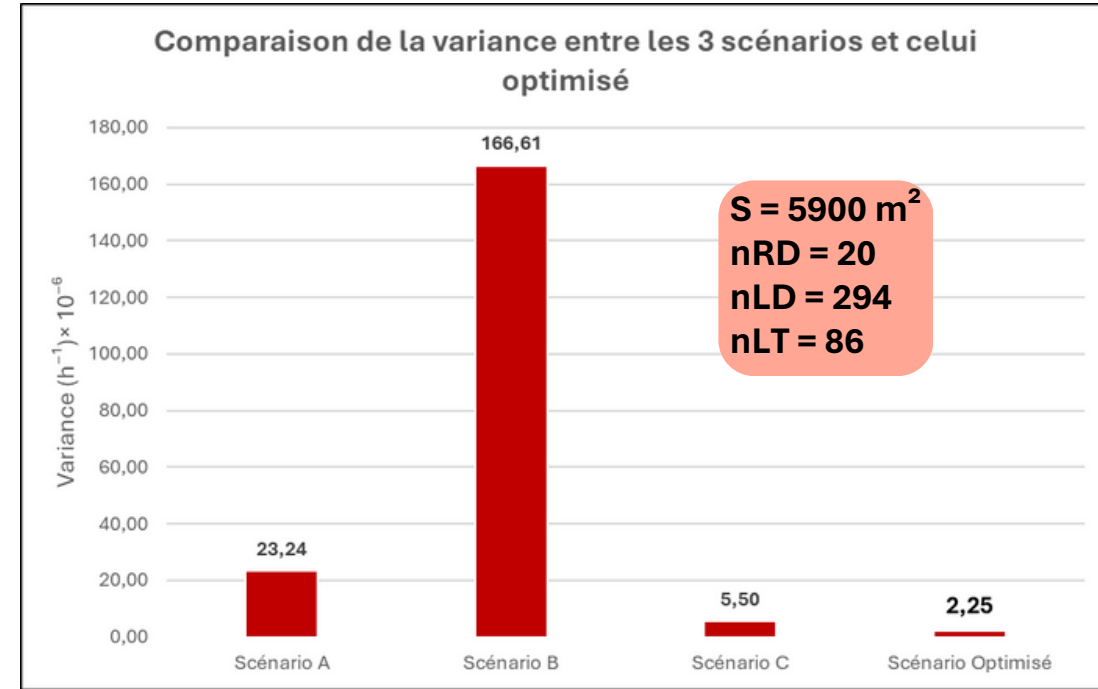
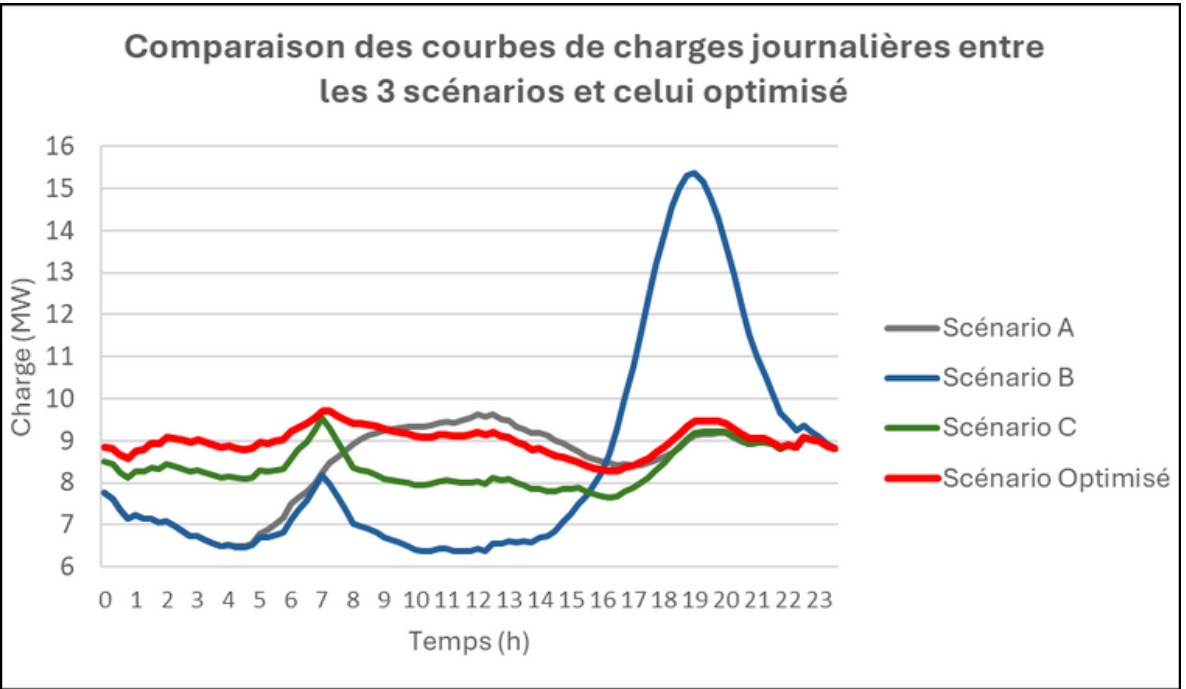
Analyse : Pour le scénario C, la variance atteint $5,5 \cdot 10^{-6}$, soit 30 fois moins que le scénario B et 4 fois moins que le scénario A, traduisant un lissage nettement plus marqué de la courbe de charge. La recharge des véhicules électriques, reportée et combinée à la production solaire, permet donc une forte atténuation des pics et creux, en lissant la courbe de charge.

Conclusion : Nous pouvons alors valider notre hypothèse et répondre à notre problématique : La généralisation du véhicule électrique contribue à lisser la courbe de charge et à intégrer totalement les énergies solaires dans le réseau électrique, mais uniquement si l'on applique des comportements de recharge particuliers, par exemple la recharge sur le lieu de travail à midi et la recharge programmée la nuit chez soi, toutes deux de manière lente.

Limites : L'étude utilise un modèle simplifié basé sur des données historiques, sans TripEnergy ni MPC, et ne prend pas en compte certains facteurs comme les comportements utilisateurs, les types de véhicules, les bornes et la puissance des chargeurs. Les méthodes high-tech d'optimisation de la recharge n'ont pas été explorées et les résultats portent sur une journée type sans considération de la saisonnalité.

Optimisation

Les variables leviers S, nRD, nLD, nLT ont été optimisées afin de minimiser la variance :



→ L'optimisation révèle un scénario 2 fois plus performant que le scénario C, renforçant ainsi notre hypothèse et le potentiel de lissage des courbes de charge pour de futures intégrations réelles des véhicules électriques. Il reste aussi à optimiser les paramètres des modes de recharge tels que l'horaire et le temps de recharge (espérance et écart-type).