

Projet recherche innovation 2024-2025

L'effet de la généralisation des Véhicules Electriques "VEs"



L'effet de la généralisation des Véhicules Electriques "VEs"

**L'effet de la généralisation des VEs sur la courbe de
charge et sa compatibilité avec l'énergie renouvelable,
notamment d'origine solaire.**

Directeur de recherche
Minjid Maïzia

Année
2024-2025

Auteur.e

Lina ALHAMD

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet recherche innovation en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon professeur, (Minjid Maïzia), pour son soutien inestimable et ses conseils avisés tout au long de ce projet. Son expertise et sa disponibilité ont été des éléments clés dans la réalisation de ce travail.

Je remercie également ma mère, mon frère et mon fiancé pour leur soutien constant, leurs encouragements, leur patience, leur compréhension et leur présence à mes côtés, qui m'ont donné la force et la motivation nécessaires pour mener à bien ce projet.

Sommaire

1. Introduction.....	1
2. Méthode.....	3
2.1. La modélisation.....	4
2.2. valeurs théorique.....	5
2.2.1. La courbe de charge.....	5
2.2.2. Energie solaire.....	6
2.2.3. Nombre de VEs.....	6
2.2.4. La puissance du chargeur.....	7
2.3. Modélisation de la recharge des VEs.....	7
2.4. Scénarios de recharge.....	8
2.4.1. Scénario 1 : Recharge des VEs sans programmation.....	8
2.4.2. Scénario 2 : Recharge des VEs programmé.....	8
2.4.3. Scénario 3 : Recharge des VEs programmé avec l'intégration d'énergie solaire.....	9
3. Résultats.....	9
3.1. Résultat scénario 1.....	9
3.2. Résultat scénario 2.....	10
3.3. Résultat scénario 3.....	11
4. Discussion.....	12
Conclusion.....	12
Annexes.....	14
Bibliographie.....	15

Directeur.rice de recherche :

Minjid Maïzia

Lina ALHAMD
PRI/DAE5
UIT/RESEAU
2024-2025

L'effet de la généralisation des Véhicules Electriques "VEs" : L'effet de la généralisation des VEs sur la courbe de charge et sa compatibilité avec l'énergie renouvelable, notamment d'origine solaire.

Résumé :

Depuis leur apparition, les véhicules électriques (VE) ont pris une place croissante en France et dans le monde, en réponse à des enjeux environnementaux, politiques et économiques. En France, des initiatives visent à interdire la vente de véhicules thermiques neufs d'ici 2035 pour réduire les émissions de CO₂ liées au transport. Cette transition est essentielle pour généraliser les VEs, perçus comme un levier stratégique pour réduire l'empreinte carbone du secteur des transports.

Contrairement aux véhicules thermiques, les VEs utilisent des moteurs électriques alimentés par des batteries rechargeables. Cette étude se concentre sur les VEs à batterie rechargeable. La généralisation des VEs pose un enjeu majeur pour les réseaux électriques, car leur utilisation à grande échelle augmentera la consommation d'électricité, modifiant la courbe de charge et nécessitant une augmentation de la production d'énergie. Selon Gryparis et al. (2020), l'intégration massive des VEs pourrait représenter entre 3 % et 25 % de la demande totale d'électricité au sein de l'Union européenne d'ici 2050.

Ce projet examine les effets de la généralisation des VEs sur la courbe de charge électrique en France et sa compatibilité avec l'intégration des énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire. L'objectif est de modérer l'impact de cette généralisation sur la courbe de charge et d'éviter la surcharge des réseaux existants tout en limitant les besoins d'expansion des infrastructures. L'hypothèse est que la généralisation des VEs, combinée à l'intégration de l'énergie solaire, pourrait lisser la courbe de charge, rendant la consommation d'électricité plus régulière et homogène tout au long de la journée.

Mots Clés :

VEs : Véhicules Electriques

AC : courant alternatif

V2G : Vehicle-to-Grid

1. Introduction

Depuis leur apparition, les véhicules électriques (VE) occupent une place croissante en France et dans le monde, en réponse à des enjeux environnementaux, politiques et économiques. En France, des initiatives visent à interdire la vente de véhicules thermiques neufs d'ici 2035, afin de réduire les émissions de CO₂ liées au transport, qui représente l'une des principales sources de pollution carbone. Cette transition marque une étape essentielle vers la généralisation des VE, perçus comme un levier stratégique pour réduire l'empreinte carbone du secteur des transports.

Contrairement aux véhicules thermiques qui fonctionnent à partir de combustibles fossiles tels que le diesel ou l'essence, les VE utilisent un ou plusieurs moteurs électriques alimentés par des **batteries rechargeables**. Plusieurs types de véhicules électriques existent, notamment : les VE à batterie, les véhicules électriques hybrides rechargeables, et les hybrides non rechargeables. Cette étude se concentre spécifiquement sur les VE à batterie rechargeable.

Cependant, la généralisation des VE pose un **enjeu** majeur pour les réseaux électriques, car leur utilisation à grande échelle entraînera une **augmentation significative de la consommation d'électricité**. Cela modifiera la courbe de charge de la consommation électrique, nécessitant une **augmentation de la production d'énergie**, avec des risques potentiels de **surcharge pour les réseaux** existants. Selon (Gryparis et al. 2020), l'intégration massive des VE pourrait, d'ici 2050, représenter entre 3 % et 25 % de la demande totale d'électricité au sein de l'Union européenne (figure 1). Cette évolution soulève également des besoins d'expansion des infrastructures.

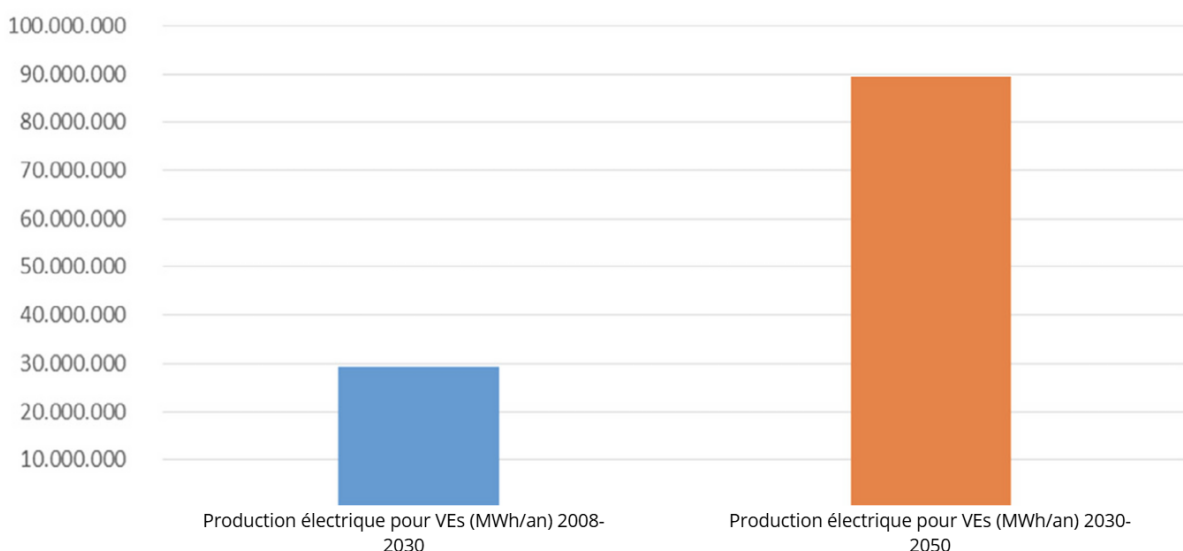


Fig. 1. Prévisions de production électrique pour les véhicules électriques dans l'UE

©Gryparis, E., Papadopoulos, P., Leligou, H. C., & Psomopoulos, C. S. (2020). Electricity demand and carbon emission in power generation under high penetration of electric vehicles. A European Union perspective. *Energy Reports*, 6, 475-486. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.09.025>

Dans ce contexte, ce projet examine les **effets** de la généralisation des VE sur **la courbe de charge électrique** en France et sa **compatibilité** avec l'intégration des énergies renouvelables, notamment **l'énergie solaire**. L'objectif est de modérer l'impact de cette généralisation sur la courbe de charge et d'éviter la surcharge des réseaux existants tout en limitant les besoins d'expansion des infrastructures.

La **courbe de charge**, ou courbe de consommation d'électricité, reflète les variations de la demande en électricité sur une période donnée, comme une journée. Elle met en évidence les périodes de **forte consommation**, appelées "**heures de pointe**" ou "**pics**", où la **demande d'électricité** atteint son **maximum**, et les **périodes de faible consommation**, dites "**heures creuses**" (figure 2).

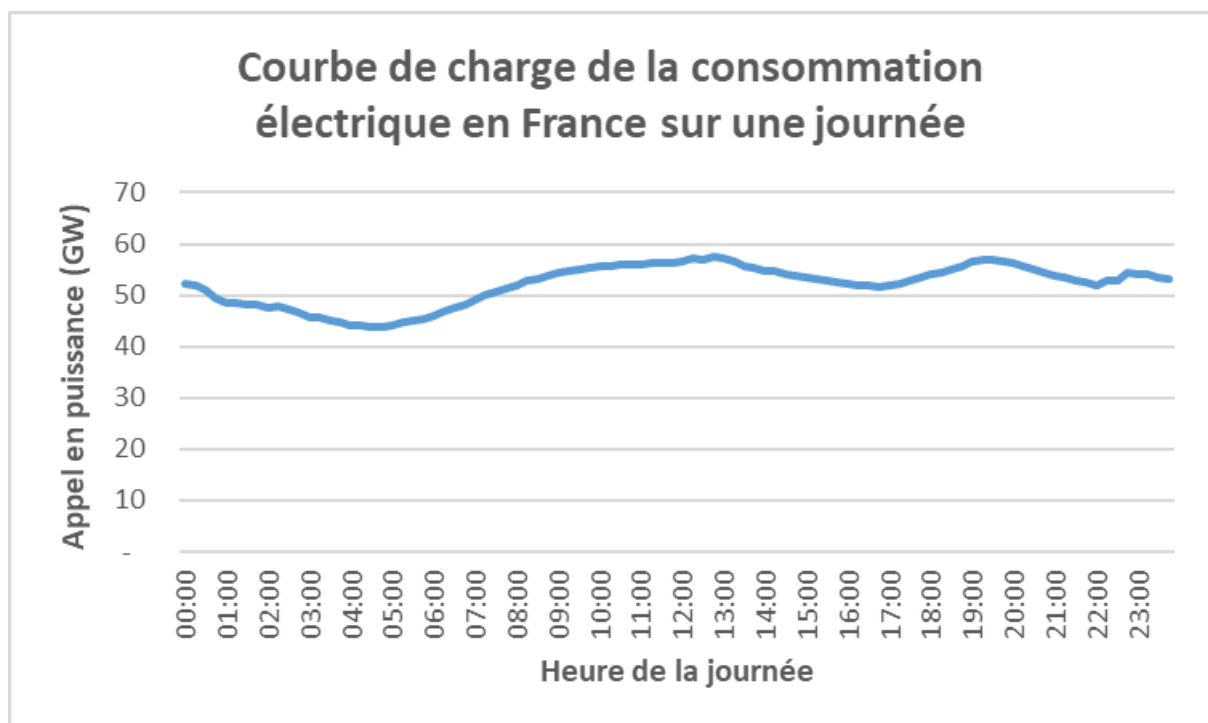


Fig. 2. Courbe de charge de la consommation électrique en France sur une journée

©Réalisé par Lina ALHAMD

Un **enjeu clé** réside dans le moment où les utilisateurs rechargent leurs véhicules électriques. Si la **recharge** se concentre principalement pendant les **heures de pointe**, cela pourrait **perturber la production électrique**, saturer les réseaux et nécessiter une extension significative des infrastructures de production (Needell et al., 2023). À l'inverse, une **recharge** majoritairement effectuée pendant les **heures creuses**, lorsque la demande est faible, optimiserait la gestion des réseaux et **limiterait les besoins** en nouvelles capacités de **production**.

Par ailleurs, les véhicules électriques représentent également un dispositif de **stockage d'énergie efficace**, notamment pour l'énergie renouvelable telle que l'énergie photovoltaïque et éolienne. Ces sources sont qualifiées d'énergie fatale en raison de leur caractère intermittent et imprévisible, car elles dépendent du soleil et des vents (Zhang et al., 2023).

La **problématique** centrale de cette étude est donc la suivante : quel sera l'**effet de la généralisation des VEs** et de l'**intégration de l'énergie solaire** sur la **courbe de charge** de la consommation d'électricité ?

L'**hypothèse** formulée dans ce projet est que la **généralisation** des VEs, **combinée** à l'intégration de l'**énergie solaire**, pourrait contribuer à **lisser la courbe de charge**, en la rendant plus régulière et homogène, et donc **plus plate** tout au long de la journée. Un tel lissage permettrait non seulement de mieux gérer les pics de consommation, mais aussi de maximiser l'utilisation de l'énergie solaire pour la recharge des VEs.

Ainsi, cette étude s'efforce de démontrer que la généralisation des VEs, associée à l'intégration de l'énergie solaire, pourrait permettre de rendre la courbe de charge plus plate. Une consommation d'électricité régulière tout au long de la journée réduirait les écarts entre les périodes de forte demande et celles de faible demande, ce qui renforcerait la stabilité des réseaux électriques.

2. Méthode

La méthode adoptée pour répondre à la problématique et valider l'hypothèse repose sur la **modélisation** de différents scénarios de recharge des VEs. L'objectif est d'évaluer l'impact de la généralisation des VEs sur la courbe de consommation d'électricité tout en analysant leur compatibilité avec les énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire.

Les scénarios modélisés considèrent deux principaux paramètres : d'une part, **les horaires de recharge**, qui influencent les variations de la courbe de charge selon les périodes de la journée (heures de pointe, heures creuses, etc.), et d'autre part, **les lieux de recharge**, en distinguant entre les recharges effectuées à domicile, sur les lieux de travail ou via des infrastructures publiques. Trois scénarios distincts, différenciés selon les horaires et les lieux de recharge, seront étudiés dans cette démarche. Toutefois, ces scénarios ne tiennent pas compte des comportements individuels des utilisateurs, comme leurs décisions spécifiques ou leurs habitudes de recharge et de décharge.

Cette méthode met également l'accent sur l'intégration de l'**énergie solaire**, car les véhicules électriques peuvent exploiter efficacement la surproduction d'énergie solaire, grâce à la régularité et la prévisibilité des variations quotidiennes de cette ressource. Cela constitue un avantage considérable par rapport à l'énergie éolienne, dont la production est plus imprévisible (Needell et al., 2023).

L'analyse sera réalisée à l'**échelle de la France**, en prenant en compte la structure actuelle du réseau électrique ainsi que le potentiel de production d'énergie solaire. Elle permettra d'évaluer l'impact des différents scénarios sur la régularité de la courbe de charge, d'estimer dans quelle mesure les énergies renouvelables peuvent répondre à cette nouvelle demande énergétique et d'identifier les ajustements nécessaires pour que le réseau électrique puisse accompagner efficacement la transition vers les véhicules électriques.

2.1. La modélisation

La modélisation est une méthode de **représentation simplifiée** permettant d'**explorer** et de **simuler** des **phénomènes complexes**. Dans le cadre de cette étude, l'objectif de la modélisation est de **visualiser l'allure** de la **courbe de charge** électrique en prenant en compte la consommation existante d'électricité, à laquelle s'ajoute la consommation liée à la recharge des VEs, à partir de valeurs théoriques.

Trois scénarios distincts de recharge des VEs seront modélisés sous forme de logigrammes (Annexe 1), ce qui permettra de simuler les effets de différentes stratégies de recharge sur la courbe de charge. Chaque scénario aboutira à une courbe de charge distincte, dont la dispersion sera évaluée à l'aide d'une mesure statistique de la **variance**. Cette dernière évalue l'écart des données par rapport à leur moyenne. Une variance faible indique que la courbe est plus plate, ce qui constitue un objectif prioritaire dans le contexte de l'intégration des VEs. Plus cette valeur se rapproche de **zéro**, plus la **courbe de charge est lisse et plate**. Bien que la variance égale à zéro soit théoriquement idéale, elle est impossible à atteindre dans des conditions réelles. Toutefois, une valeur proche de zéro témoigne d'une meilleure efficacité et d'une stabilité accrue de la courbe de charge.

Pour chaque scénario, la courbe de consommation liée à la recharge des VEs sera ajoutée à la courbe de charge existante (qui représente toutes les autres consommations d'électricité). Cela permettra d'obtenir une courbe de charge finale après généralisation. Les étapes du processus sont les suivantes :

1. Modélisation des trois scénarios de recharge (logigrammes).
2. Calcul de la courbe de charge résultante pour chaque scénario.

3. Évaluation de la variance de chaque courbe afin de comparer les résultats et d'identifier la stratégie de recharge permettant de lisser la courbe.

Les valeurs utilisées pour cette modélisation sont théoriques et incluent :

- La courbe de charge avant la généralisation des VEs.
- Le nombre de VEs modélisés.
- La puissance des chargeurs utilisés pour la recharge des VEs.

Cette approche permettra de mettre en évidence les impacts des différentes stratégies de recharge sur la stabilité de la courbe de charge et d'évaluer leur compatibilité avec les objectifs de lisser les variations de la consommation électrique.

2.2. valeurs théorique

Cette partie de l'étude porte sur les valeurs choisies dans le cadre de la méthode pour réaliser les calculs et la modélisation. Ces valeurs incluent celles utilisées pour tracer la courbe de charge représentant la consommation électrique existante avant la généralisation des véhicules électriques, ainsi que les données spécifiques liées aux VEs.

2.2.1. La courbe de charge

La courbe de charge utilisée pour les calculs correspond à la **moyenne** de plusieurs **courbes de charge** représentant la consommation quotidienne d'électricité en France¹ pour des jours significatifs de l'année 2024 (figure 2). Les jours ont été sélectionnés selon plusieurs critères:

- **Le jour le plus froid de l'année**, où la consommation d'électricité est la plus élevée.
- **Le jour le plus chaud de l'année**, caractérisé par une forte consommation estivale.
- **Un jour avec la consommation la plus faible**, par rapport aux autres jours de l'année.
- **Un jour avec une consommation normale**, où il n'y a ni forte consommation pendant les heures de pointe ni faible consommation en dehors des pics.

Les jours choisis permettent de tenir compte des différents impacts climatiques et des périodes critiques sur la consommation d'électricité et la courbe de charge.

¹ Ces données ont été collectées à partir du site de RTE (Réseau de Transport d'Électricité). ©*Courbes de consommation—RTE Portail Services*. (s. d.). Portail Services RTE. Consulté 28 janvier 2025, à l'adresse <https://www.services-rte.com/fr/visualisez-les-donnees-publiees-par-rte/courbes-de-consommation.html>

La courbe de charge obtenue, issue de la moyenne de ces journées, est donc une valeur théorique, représentative des tendances globales et utilisée comme référence pour cette étude.

2.2.2. Energie solaire

Pour construire la courbe de production d'énergie solaire, j'ai calculé la moyenne annuelle de la production solaire en France². Cela m'a permis d'obtenir 24 valeurs représentant la production solaire moyenne à chaque heure d'une journée sur l'ensemble de l'année (figure 3). On peut ainsi remarquer que le maximum de production solaire se situe entre 12h et 13h.

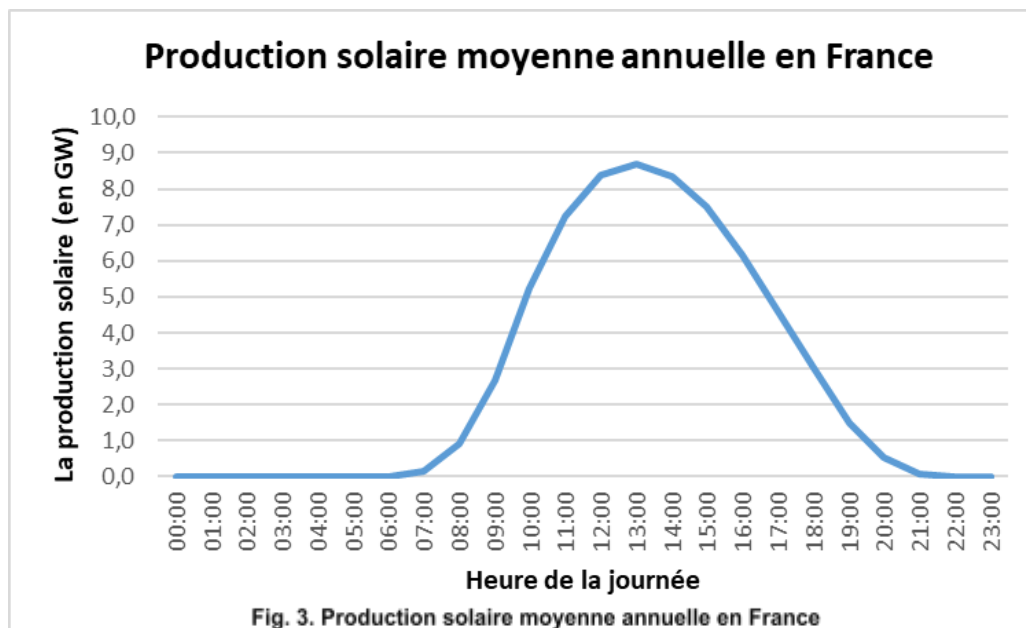


Fig. 3. Production solaire moyenne annuelle en France

©Réalisé par Lina ALHAMD

2.2.3. Nombre de VEs

Pour modéliser la consommation électrique des VEs, il est nécessaire de déterminer le nombre de véhicules représentant la généralisation. Ce chiffre est calculé sur la base d'un pourcentage appliqué au nombre total de voitures en circulation en France au 1er janvier 2025, soit **39,3 millions de voitures**³.

² Ces données ont été collectées à partir du site de RTE (Réseau de Transport d'Électricité). ©Téléchargez les données publiées par RTE - RTE Portail Services. (s. d.). Portail Services RTE. Consulté 28 janvier 2025, à l'adresse <https://www.services-rte.com/fr/telechargez-les-donnees-publiees-par-rte.html>

³ ©39,3 millions de voitures en circulation en France au 1er janvier 2024. (s. d.). Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports. Consulté 26 janvier 2025, à l'adresse <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/393-millions-de-voitures-en-circulation-en-france-au-1er-janvier-2024>

En tenant compte des efforts visant à interdire la vente des voitures thermiques à partir de 2035, il est supposé que les VEs représenteront **95 %** du parc automobile dans le scénario de généralisation. Ainsi, le nombre de VEs retenu pour cette étude s'élève à **37,335 millions de véhicules électriques**, valeur utilisée pour effectuer les calculs.

2.2.4. La puissance du chargeur

La puissance d'un chargeur de véhicule électrique représente la quantité d'énergie électrique qu'il peut fournir à la batterie du véhicule par unité de temps. Cette puissance détermine également la vitesse de recharge des VEs : plus la puissance est élevée, plus la recharge est rapide, à condition que la batterie du véhicule puisse supporter cette puissance (James et al., 2020).

En général, on distingue deux types de puissances de charge :

1. **Recharge lente** : Une puissance de **3,7 kW**, nécessitant de **6 à 12 heures** pour une recharge complète.
2. **Recharge rapide** : Une puissance de **7,4 kW**, permettant une recharge en environ **4 heures**.

Dans cette étude, la puissance choisie pour la modélisation est de **7,4 kW en courant alternatif (AC)**⁴, correspondant à un chargeur de type recharge rapide, comme celui utilisé par des véhicules populaires tels que la Nissan Leaf. Ce choix est motivé par la recherche d'un **équilibre** entre **confort d'utilisation** et **accessibilité financière**, les utilisateurs préférant généralement éviter les recharges lentes tout en ayant accès à des véhicules à un prix abordable.

Enfin, bien que le comportement des utilisateurs (par exemple, leurs habitudes de recharge) puisse influencer le besoin de recharger les VEs, cet aspect ne sera pas étudié dans cette recherche.

2.3. Modélisation de la recharge des VEs

Pour modéliser la consommation électrique liée aux VEs, j'ai utilisé la **loi normale**, également appelée "loi gaussienne". Cette loi de **probabilité**, largement utilisée en statistique et en mathématiques, permet de décrire une distribution en forme de cloche, appelée courbe de Gauss. Elle est particulièrement adaptée pour modéliser une large quantité de données, comme c'est le cas ici pour les VEs.

La courbe de consommation des VEs obtenue à partir de cette modélisation repose sur plusieurs paramètres :

⁴ AC utilisé pour la recharge rapide, (James et al., 2020).

- **La moyenne**, qui représente la valeur centrale de la courbe et correspond à l'heure moyenne de recharge dans cette étude.
- **L'écart type**, qui indique la dispersion ou l'étalement de la période de recharge.
- **L'appel de puissance**, qui correspond à la puissance totale requise pour la recharge des VEs.

Cette approche a été appliquée aux différents scénarios de recharge, chacun ayant des horaires et des étalements spécifiques.

2.4. Scénarios de recharge

Pour évaluer l'impact de la généralisation des VEs sur la courbe de consommation électrique et analyser leur compatibilité avec l'énergie solaire, j'ai élaboré trois scénarios de recharge. Ces scénarios tiennent compte des horaires et des lieux de recharge, ainsi que de l'intégration éventuelle d'énergies renouvelables.

2.4.1. Scénario 1 : Recharge des VEs sans programmation

Dans ce scénario, la recharge des VEs est effectuée dès le retour des utilisateurs à leur domicile, généralement après le travail. La courbe de consommation est centrée sur **19h00**, avec un étalement de **4 heures** : la recharge commence à **17h00** et se termine à **21h00**. Ainsi, 100 % des VEs sont rechargés durant cette période. Ce scénario correspond à une recharge réalisée uniquement à domicile, pendant les heures de pointe, ce qui pourrait accentuer les pics de consommation électrique. C'est pourquoi ce scénario peut être qualifié de "recharge irresponsable".

2.4.2. Scénario 2 : Recharge des VEs programmé

Ce scénario vise à optimiser la courbe de charge électrique en identifiant des plages horaires qui permettent de réduire les pics et les creux. Deux lois normales distinctes ont été utilisées pour modéliser les périodes de recharge :

- **Recharge nocturne à domicile** : Une courbe centrée sur **4h00**, avec un étalement de **4 heures**. Ce choix correspond à une recharge réalisée durant les heures creuses, lorsque la demande en électricité est faible. Ainsi, 70 % des VEs sont rechargés durant cette période, ce qui représente la plage horaire la plus propice pour réduire les pics de consommation tout en comblant les creux de la courbe de charge.
- **Recharge sur le lieu de travail** : Une courbe centrée sur **16h00**, également avec un étalement de **4 heures**, pour représenter une recharge effectuée avant la fin de la journée de travail. Dans ce cas, seulement 30 % des VEs sont rechargés, car bien que cette période corresponde à une consommation relativement faible, elle n'est pas aussi favorable que les heures nocturnes.

L'objectif est de répartir la consommation sur des périodes moins critiques, contribuant ainsi à une courbe de charge plus équilibrée.

2.4.3. Scénario 3 : Recharge des VEs programmé avec l'intégration d'énergie solaire

Dans ce scénario, j'ai modélisé l'impact de l'intégration de l'énergie solaire en plus de la programmation des horaires de recharge. La production d'énergie solaire, en moyenne, s'étend entre **7h00 et 21h00**, avec un pic de production entre 12h00 et 13h00. Deux lois normales ont été définies :

- **Recharge nocturne à domicile** : Une courbe centrée sur **3h00** avec un étalement de **4 heures**, pour représenter une recharge réalisée pendant les heures creuses. Durant cette période, 40 % des VEs sont rechargés.
- **Recharge diurne sur le lieu de travail** : Une courbe centrée sur 12h00, avec un étalement de 4 heures, correspondant au pic de production solaire. 60 % des VEs sont rechargés durant cette période, en coïncidence avec la disponibilité de l'énergie solaire.

La courbe de charge finale est obtenue par la combinaison suivante :

1. Ajout de la courbe de consommation initiale (avant la généralisation des VEs).
2. Ajout de la courbe de consommation électrique liée à la recharge des VEs.
3. Soustraction de la courbe de production d'énergie solaire.

Ce scénario propose une recharge mixte :

- Une recharge nocturne à domicile.
- Une recharge diurne sur le lieu de travail, alimentée par la production solaire.

L'intégration de l'énergie solaire dans ce scénario vise à réduire les écarts entre les pics et les creux de consommation, tout en maximisant l'utilisation des énergies renouvelables.

3. Résultats

3.1. Résultat scénario 1

Ce scénario met en évidence qu'une recharge non programmée et effectuée de manière irresponsable, sans gestion des horaires, accentue considérablement les pics de la courbe de charge. Elle augmente également l'écart entre les pics et les creux. En effet, la variance de la courbe de charge dans ce scénario atteint **174 GW²**, alors que celle de la courbe de charge sans généralisation des véhicules électriques est de seulement **16 GW²**.

Ces résultats indiquent une augmentation significative des variations sur la courbe, aggravant ainsi les pics de consommation et rendant la courbe de charge beaucoup moins lisse (figure 4).

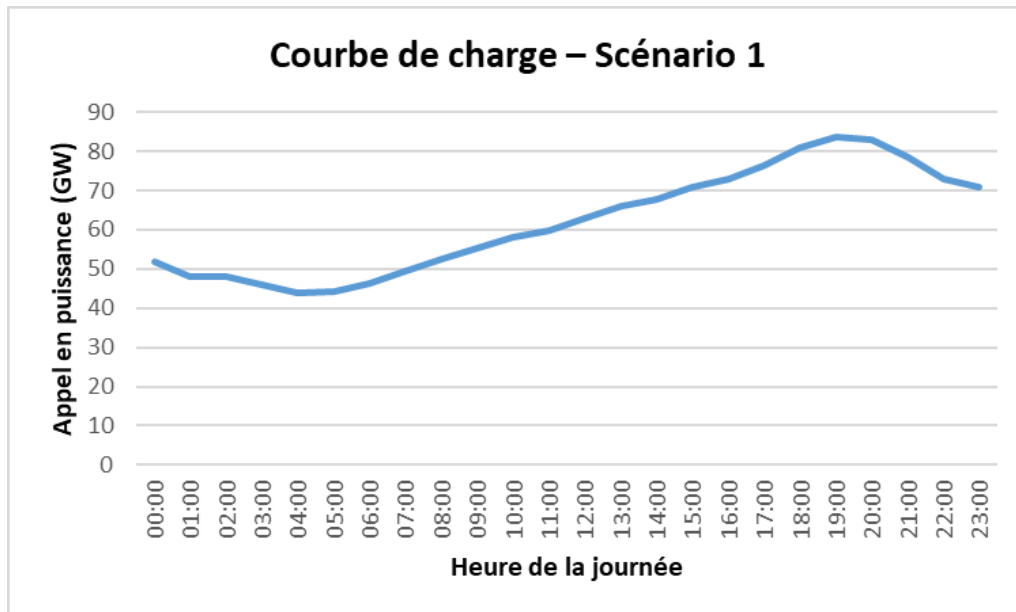


Fig. 4. Courbe de charge – Scénario 1

©Réalisé par Lina ALHAMD

3.2. Résultat scénario 2

La variance pour ce scénario est de **7,99 GW²**, soit une diminution considérable par rapport au premier scénario. Cela démontre que les horaires de recharge choisis pour cette modélisation permettent d'obtenir une courbe de charge bien plus lisse après la généralisation des VEs.

L'analyse montre qu'il n'y a plus de grandes différences entre la consommation aux heures de pointe "pics" et celle des heures creuses. Ce scénario contribue ainsi à combler les creux, rapprochant leurs valeurs de celles des pics.

En outre, une comparaison entre la variance de ce scénario et celle de la courbe de charge avant la généralisation montre que la courbe devient plus homogène et plus plate. Comme illustré dans (figure 5), on observe que les valeurs de consommation se situent entre 55 GW et 65 GW. Toutefois, bien que visuellement la courbe semble légèrement plus homogène, cela n'est pas parfaitement perceptible sur le graphique. C'est pourquoi l'utilisation de la variance est cruciale pour quantifier et démontrer objectivement que la courbe de charge est effectivement plus plate.

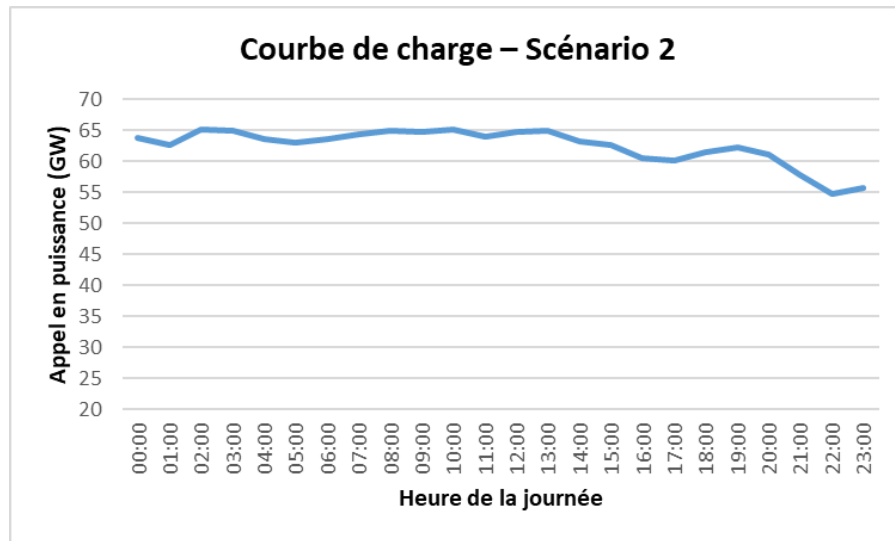


Fig. 5. Courbe de charge – Scénario 2

©Réalisé par Lina ALHAMD

3.3. Résultat scénario 3

Le troisième scénario présente la variance la plus faible, à savoir **3,9 GW²**, ce qui en fait le scénario optimal pour la recharge des VEs. Ce résultat traduit une courbe de charge quasi parfaitement lisse et homogène (figure 6), avec un écart minimal entre les pics de consommation et les creux, puisque la variance est plus proche de zéro.

Ce scénario illustre l'efficacité d'une programmation réfléchie des horaires de recharge, combinée à l'intégration de l'énergie solaire. Ensemble, ces stratégies permettent d'obtenir une consommation électrique beaucoup plus stable tout au long de la journée. L'impact de l'énergie solaire est particulièrement notable, puisqu'elle réduit significativement la demande électrique liée à la recharge des VEs, notamment durant les périodes de production solaire maximale.

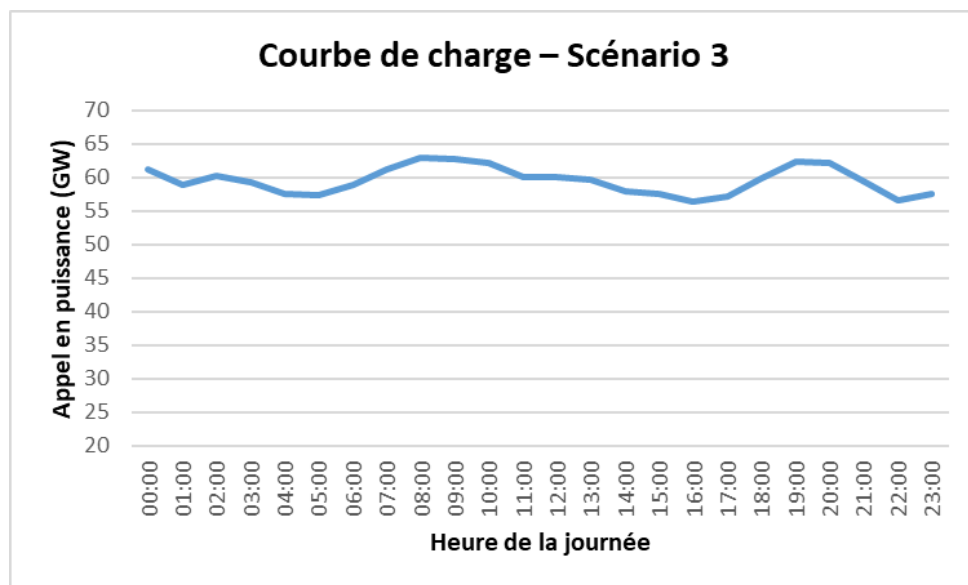


Fig. 6. Courbe de charge – Scénario 3

©Réalisé par Lina ALHAMD

4. Discussion

Les résultats obtenus pour les trois scénarios modélisés confirment que la programmation des horaires de recharge et l'intégration de l'énergie solaire représentent la solution la plus efficace pour la recharge des VE. Dans le scénario 3, la **valeur de la variance** est particulièrement **faible**, indiquant une **courbe de charge beaucoup plus lisse après la généralisation des VEs**. En optant pour des horaires de recharge pendant la production solaire et la nuit, ce scénario **valide l'hypothèse selon laquelle la combinaison de la généralisation des VEs avec l'intégration de l'énergie solaire permet de rendre la courbe de charge plus lisse et plus plate**. Ce mécanisme contribue à mieux répartir la consommation d'électricité tout au long de la journée, réduisant ainsi les pics de consommation et les creux.

Dans ce scénario, la variance de la courbe de charge a **diminué de 75 %** par rapport à la situation avant la généralisation, ce qui valide de manière significative l'hypothèse. Ces résultats soulignent l'importance de l'intégration des énergies renouvelables et de la programmation des horaires de recharge pour gérer efficacement la demande énergétique et minimiser les perturbations sur les réseaux électriques. Cela démontre que, grâce à une gestion optimisée des recharges et à l'utilisation de l'énergie solaire, il est possible de rendre la consommation d'électricité plus régulière tout en réduisant l'impact sur les infrastructures.

Les résultats du scénario 1 montrent que la généralisation des VEs entraînera une augmentation de la demande d'électricité, accentuée par une recharge irresponsable concentrée pendant les heures de pointe. Cela engendrerait un besoin d'agrandissement des infrastructures pour répondre à cette nouvelle demande, un résultat que l'on cherche à éviter.

En revanche, le scénario 2 démontre qu'une simple programmation des horaires de recharge peut déjà rendre la courbe de charge plus plate. En évitant les heures de pointe et en privilégiant les périodes creuses de la nuit ou les heures de travail, où la demande est plus faible, la variance devient plus petite par rapport à la situation avant la généralisation, rapprochant ainsi la courbe de charge de l'idéal de zéro.

Conclusion

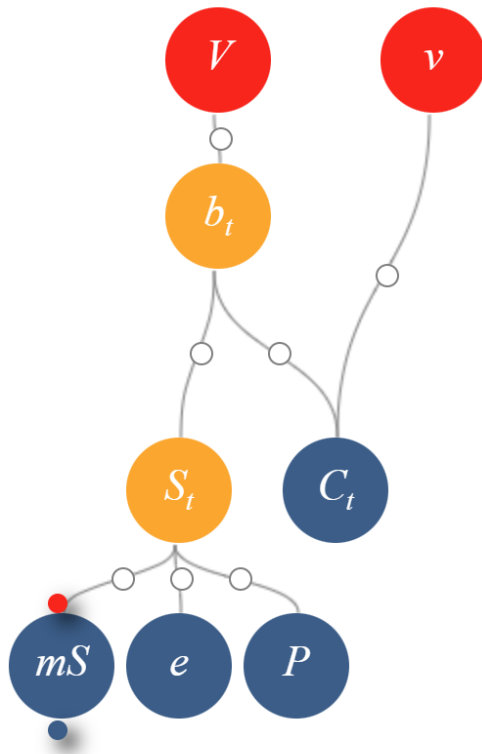
En conclusion, on peut affirmer que **la recharge responsable et l'utilisation maximale de l'énergie solaire** montrent que la **généralisation des véhicules électriques (VEs)** contribue à **rendre la courbe de charge plus lisse** et à obtenir une consommation d'électricité plus régulière tout au long de la journée. Pour obtenir ces résultats, il est essentiel de bien choisir les horaires de recharge, de distribuer des bornes de recharge de manière stratégique pour permettre aux utilisateurs de recharger pendant les horaires de travail, et de sensibiliser les utilisateurs afin qu'ils adoptent les meilleures pratiques de recharge. De plus, il est nécessaire d'investir dans l'intégration de l'énergie solaire pour alimenter les VEs, car cette étude a bien démontré la **compatibilité de l'énergie solaire**

avec la **généralisation des VEs**, notamment en combinant cette dernière avec la production solaire, ce qui a permis d'obtenir les meilleurs résultats.

Pour aller plus loin, la généralisation des VEs ne se limite pas à rendre la courbe de charge plus lisse, mais représente également une **solution pour stocker l'énergie électrique** et la **réutiliser** pendant les heures de pointe afin de réduire la charge sur les réseaux. La technologie **Vehicle-to-Grid (V2G)** est une approche prometteuse pour contrôler et planifier la charge et la décharge des VEs. Le V2G permet de **puiser et redistribuer** l'énergie stockée dans la batterie d'un véhicule électrique vers le réseau. Cette technologie permet de charger ou décharger la batterie en fonction des besoins du réseau, de la demande et de la capacité de celui-ci. De plus, elle peut jouer un rôle clé dans le stockage de l'énergie fatale produite par les énergies renouvelables, notamment lors de périodes de surproduction. La décharge dans le réseau peut être particulièrement utile pour maximiser la consommation d'énergie renouvelable produite, notamment lors des prochaines périodes de charge (Zhang et al., 2023).

Cependant, il convient de noter que la méthode utilisée présente certaines limites pour considérer ces résultats comme pleinement valides. En effet, l'utilisation de valeurs théoriques et de moyennes peut affecter la précision des résultats, et il est important de prendre en compte ces limites lors de l'interprétation des données.

Annexes



Annexe 1 : Logigramme pour la modélisation des calculs

Ce logigramme permet de modéliser les calculs nécessaires à l'analyse. Les variables en **rouge** représentent les résultats finaux que nous souhaitons obtenir, à savoir la variance de la courbe de charge avant et après la généralisation des véhicules électriques (VEs). Les variables en **jaune**, quant à elles, sont des variables endogènes, calculées à partir de valeurs exogènes qui sont les bleues. Elles représentent des facteurs que nous pouvons contrôler et ajuster au cours de l'analyse.

Bibliographie

- 39,3 millions de voitures en circulation en France au 1er janvier 2024. (s. d.). Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports. Consulté 26 janvier 2025, à l'adresse <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/393-millions-de-voitures-en-circulation-en-france-au-1er-janvier-2024>
- Anastasiadis, A. G., Kondylis, G. P., Polyzakis, A., & Vokas, G. (2019). Effects of Increased Electric Vehicles into a Distribution Network. *Energy Procedia*, 157, 586-593. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.223>
- *Courbes de consommation—RTE Portail Services*. (s. d.). Portail Services RTE. Consulté 28 janvier 2025, à l'adresse <https://www.services-rte.com/fr/visualisez-les-donnees-publiees-par-rte/courbes-de-consommation.html>
- Dixon, J., & Bell, K. (2020). Electric vehicles : Battery capacity, charger power, access to charging and the impacts on distribution networks. *eTransportation*, 4, 100059. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100059>
- Gryparis, E., Papadopoulos, P., Leligou, H. C., & Psomopoulos, C. S. (2020). Electricity demand and carbon emission in power generation under high penetration of electric vehicles. A European Union perspective. *Energy Reports*, 6, 475-486. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.09.025>
- Needell, Z., Wei, W., & Trancik, J. E. (2023). Strategies for beneficial electric vehicle charging to reduce peak electricity demand and store solar energy. *Cell Reports Physical Science*, 4(3), 101287. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2023.101287>
- *Téléchargez les données publiées par RTE - RTE Portail Services*. (s. d.). Portail Services RTE. Consulté 28 janvier 2025, à l'adresse <https://www.services-rte.com/fr/telechargez-les-donnees-publiees-par-rte.html>

- Zhang, G., Dai, M., Zhao, S., & Zhu, X. (2023). Orderly automatic real-time charging scheduling scenario strategy for electric vehicles considering renewable energy consumption. *Energy Reports*, 9, 72-84. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.164>