



Les synergies entre véhicules électriques et bâtiments : comment les exploiter ?

L'avenir appartient au véhicule électrique et les Français continueront à se recharger majoritairement soit à leur domicile, soit sur leur lieu de travail. Valoriser les synergies entre mobilité électrique et bâtiments, y compris leurs installations photovoltaïques, est l'un des points clés de l'électrification des usages. Pourtant ces synergies sont encore très peu exploitées. L'étude d'Équilibre des Énergies chiffre les enjeux et trace la marche à suivre pour les exploiter.

Jean-Pierre Hauet,
président du Comité scientifique

Servan Lacire,
conseiller technique

Olivier Lagrange,
responsable des affaires législatives
Équilibre des Énergies

Un enjeu trois fois gagnant

Le bâtiment connaît aujourd'hui trois évolutions majeures :

- une électrification croissante accompagnée d'un effort de rénovation énergétique, dans le tertiaire comme dans le résidentiel. Les pompes à chaleur pourraient ainsi assurer le chauffage de 60 % des logements en 2050, en combinant électricité décarbonée et prélèvement de chaleur renouvelable sur l'environnement ;
- un développement très important des installations photovoltaïques de toiture ou de façade qui produiront des quantités considérables d'électricité dans la journée qu'il faudra valoriser localement plutôt que de les renvoyer sur le réseau où elles risquent de devenir excédentaires ;
- un développement rapide des véhicules électriques qui, malgré le ralentissement actuel, conduira à un parc de plus de 36 millions de véhicules légers en 2050. Ces véhicules électriques se rechargeront, pour l'essentiel, au domicile ou sur le lieu de travail.

Depuis des décennies, les systèmes de gestion de l'énergie s'efforcent de faire des bâtiments des *smart homes* ou des *smart buildings*, dans lesquels la complémentarité entre usages permet de contenir les appels sur le réseau et de réduire les charges pesant sur les consommateurs. L'exemple le plus parlant est celui des ballons d'eau chaude rechargés en heures creuses qui permettent de déplacer à la pointe plus de 4 GW sur le réseau.

Mais le potentiel des flexibilités offertes par le véhicule électrique est encore largement inexploité. Pourtant, il est considérable. Progressivement, la consommation des véhicules électriques va monter en puissance et, en 2050, dépassera celle dévolue au chauffage, à la ventilation et à la production d'eau chaude sanitaire (figure 1).

En l'absence de pilotage, les véhicules électriques pourraient occasionner un appel de puissance additionnelle sur les réseaux de 6 à 13 GW en 2035 et de 15 à 31 GW en 2050 (figure 2).

Or le simple pilotage de la recharge en heures creuses permettrait, selon RTE, de décaler cet appel de puissance à hauteur de 8 à 10 GW dès 2035 vers des périodes où le réseau est en sous-charge. De plus, le parc de véhicules électriques en circulation va offrir à l'avenir une capacité de stockage par batterie considérable qui dépassera 2 000 GWh en 2050. En admettant qu'une fraction de quelque 5 % seulement puisse être mobilisée, ce sont environ 100 GWh ou encore 50 GW sur deux heures¹ qui pourraient constituer une réserve de flexibilité.

Exploiter les synergies entre mobilité électrique et bâtiments, y compris leurs installations photovoltaïques, présente un triple enjeu :

- pour les producteurs et les fournisseurs : valoriser les productions d'électricité aux moments où elles sont les plus abondantes et les moins coûteuses ;
- éviter les surcharges sur le réseau et les investissements additionnels qu'elles peuvent entraîner ;
- diminuer le coût de la recharge pour le consommateur et rendre ainsi l'usage du véhicule électrique encore plus attractif.

- diminuer le coût de la recharge pour le consommateur et rendre ainsi l'usage du véhicule électrique encore plus attractif.

L'étude réalisée par Équilibre des Énergies, avec le concours de ses membres et de partenaires extérieurs, avait pour objectif de mieux les identifier, de chiffrer les avantages qui peuvent en résulter et de lister les conditions à remplir pour leur exploitation.

Le pilotage de la recharge

Le pilotage de la recharge est la clé permettant de tirer parti des synergies latentes. Usuellement, deux grandes formes de pilotage sont considérées : le pilotage monodirectionnel et le pilotage bidirectionnel.

Le pilotage monodirectionnel

On distingue deux types de solutions monodirectionnelles :

- **Le pilotage tarifaire statique** qui consiste à positionner la recharge pendant les périodes où l'électricité est la moins chère (heures creuses). Cette méthode s'apparente à la gestion des ballons d'eau chaude mais avec un enjeu beaucoup plus important. Le pilotage peut se faire par connexion d'une borne pilotable avec le compteur communicant ou par programmation sur le véhicule. Très facile à mettre en œuvre, le pilotage tarifaire statique reste aujourd'hui trop faiblement utilisé. En 2024, seuls 32 % des usagers déclarent piloter leur recharge. ●●●

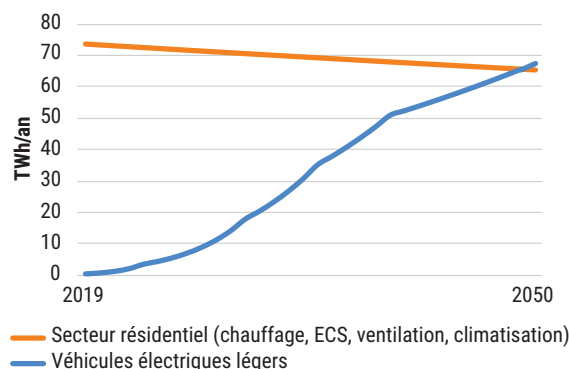


Fig. 1 : Évolution prévisionnelle des consommations d'électricité du secteur résidentiel comparées à celle des véhicules électriques légers. Source : Scénario de référence des Futurs énergétiques 2050 de RTE (2022).

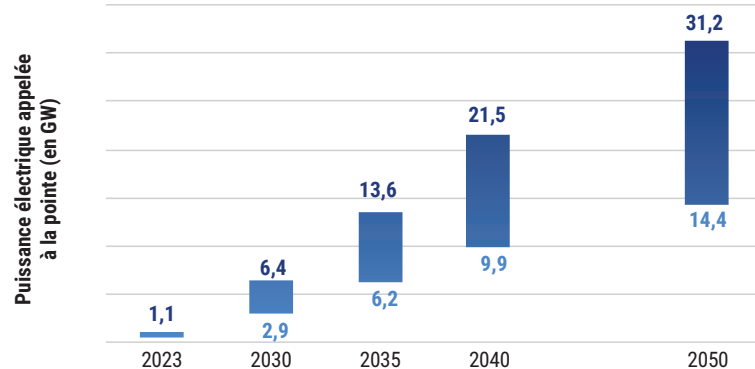


Fig. 2 : Puissance électrique appelée par le parc de véhicules électriques légers dans l'hypothèse d'une recharge 100 % naturelle.

Source : d'après données RTE.

1. A titre d'ordre de grandeur, on rappelle que la capacité de stockage des STEP (systèmes de transfert d'énergie par pompage) est aujourd'hui en France d'environ 100 GWh.

- **Le pilotage dynamique**, ou intelligent, ou encore V1G, qui consiste à piloter la recharge en fonction de paramètres évolutifs provenant du réseau, du véhicule, du fournisseur, de la production locale, des autres postes de consommation, etc.

L'objectif peut être de piloter en temps quasi-réel la recharge, à un pas de temps plus ou moins court, pour permettre au consommateur de bénéficier à chaque instant des conditions tarifaires les plus favorables. On parle alors de **pilotage tarifaire dynamique**. Le pilotage peut aussi avoir comme objectif de maintenir la puissance appelée dans les limites de la puissance souscrite. Il peut également être activé à l'initiative du système électrique dans un contexte de tension sur le réseau.

Dans tous les cas, une liaison est nécessaire entre la borne de recharge, ou le véhicule, et un agent extérieur (fournisseur, opérateur de recharge, agrégateur) qui envoie des signaux numériques à la borne ou au véhicule afin d'adapter la recharge en conséquence.

Le pilotage dynamique est aujourd'hui peu répandu.

Le pilotage bidirectionnel

La recharge bidirectionnelle consiste à utiliser, à certaines périodes de la journée, l'énergie stockée dans la batterie du véhicule pour la réinjecter dans le système électrique. La batterie devient alors, comme les panneaux solaires à d'autres moments, une source d'énergie. Deux variantes sont distinguées :

- **Le V2H (Vehicle to Home) ou V2B (Vehicle to Building)** dans lequel, à certaines périodes de la journée, l'énergie stockée dans la batterie du véhicule est réinjectée pour satisfaire localement les besoins énergétiques du bâtiment. L'enjeu du V2B/V2H est élargi par rapport au V1G car l'optimisation porte sur l'ensemble des consommations d'énergie du bâtiment.
- **Le V2G (Vehicle to Grid)** qui consiste à réinjecter vers le réseau électrique une partie de l'électricité stockée dans la batterie au-delà de la satisfaction des besoins locaux. Le V2G est susceptible d'apporter une contribution positive à l'équilibrage des réseaux

mais suppose, pour être mis en œuvre, que soient satisfaits des prérequis plus exigeants que pour le V2H.

Des offres de V2H et V2G émergent sur le marché (Renault, Volkswagen, Dreeve) mais dans des configurations spécifiques relatives au choix des bornes et des fournisseurs d'électricité. Il est généralement admis que le V2G se déploiera essentiellement dans le cadre de parcs de véhicules importants fédérés par un même gestionnaire.

Quatre cas d'usage

L'étude menée par Équilibre des Énergies a consisté à analyser quatre cas d'usage usuels où sont susceptibles d'être valorisées les synergies entre les véhicules électriques et les bâtiments, grâce à un pilotage approprié de la recharge.

La maison individuelle dotée d'un emplacement de stationnement

Un cas fréquent est celui d'une maison individuelle dotée d'un emplacement de stationnement. Nous avons considéré le cas d'une maison de 114 m², située en zone H2b, construite au début des années 2000, donc moyennement isolée, chauffée par radiateurs électriques et dotée d'un ballon d'eau chaude.

Le véhicule électrique est doté d'une batterie de 60 kWh. Il parcourt 14 000 km par an, en régime pendulaire 5 jours sur 7 à raison de 40 km par jour, avec, en complément, huit grands déplacements par an de chacun 500 km (aller/retour).

Des scénarios assez complexes de V2H ont été testés, consistant à stocker dans la batterie du véhicule à des fins de

réutilisation locales des blocs de 12 ou 15 kWh compatibles avec la taille de la batterie et l'usage fait du véhicule, de façon que la qualité de service ne soit pas compromise (figure 3).

En variante, a été considéré le cas d'une occupation plus sédentaire, pouvant correspondre à un régime de télétravail. Il a été également envisagé l'existence d'une installation photovoltaïque composée de huit panneaux délivrant une puissance crête de 3 kW et pouvant produire d'avril à octobre un excédent d'électricité d'environ 1 300 kWh susceptibles d'être stockés dans la batterie du véhicule avant utilisation locale en heures de pointe.

Les bâtiments collectifs à usage résidentiel dotés d'un parking

Ce cas, également très fréquent, conduit à distinguer deux variantes :

- celle où l'infrastructure de recharge constitue une extension du réseau public ;
- celle où l'infrastructure est exploitée par un opérateur privé.

Dans le premier cas, le consommateur dispose de degrés de libertés proches de ceux d'un occupant de maison individuelle, mais avec cependant l'impossibilité de mettre en œuvre le V2H. Dans le second cas, c'est l'opérateur qui pilote la recharge des véhicules, en veillant à ne pas dépasser la puissance souscrite prévue par le contrat passé avec un fournisseur.

En option, a été testé le cas où un gestionnaire commun assure le pilotage de la recharge et l'exploitation d'une installation photovoltaïque (photo 1).

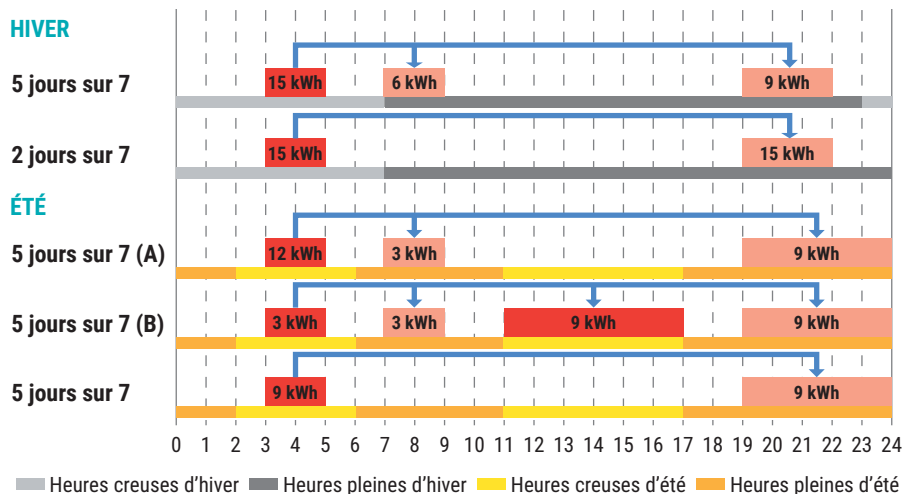


Fig. 3 : Exemple de scénario en V2H testé sur la maison individuelle.

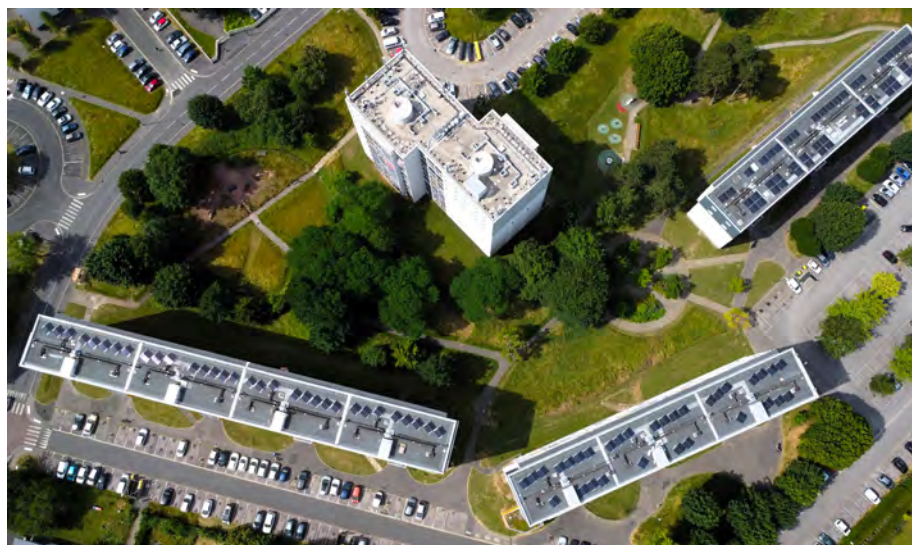


Photo 1 : Exemple de la résidence Mac Orlan à Amiens. Cette résidence est dotée de 424 m² de panneaux solaires, offrant 86 kWc de puissance installée et produisant annuellement 75 MWh d'électricité.

@Amsom Habitat.

Les bâtiments tertiaires multi-occupants

Dans ce cas, l'infrastructure de recharge est généralement exploitée par un opérateur commun à l'immeuble, qui peut être le propriétaire ou une société tierce spécialisée.

Les véhicules sont présents aux heures de bureau et généralement pas la nuit. Les utilisateurs n'ont pas le choix de la tarification mais peuvent arbitrer entre recharge sur le lieu de travail ou recharge à domicile.

L'opérateur de recharge doit optimiser son approvisionnement en électricité et veiller à respecter la puissance souscrite.

Les bâtiments tertiaires mono-occupants et les entreprises industrielles

Ce cas recouvre des situations variées : petit tertiaire en centre-ville, établissements industriels, sièges d'entreprise, nouveaux quartiers, etc. On y rencontre plusieurs types de véhicules : véhicules de fonction, véhicules de service (la nuit), véhicules de collaborateurs.

Le point commun est que l'entreprise assure généralement la responsabilité de l'infrastructure de recharge, elle est maître du contrat souscrit et de la gestion des véhicules, certains pouvant être rechargés la nuit, alors que d'autres devront l'être le jour. Le V2B et le V2G sont envisageables.

Trois scénarios de prix

Ces cas d'usage ont été croisés, pour les quatre modes de pilotage envisagés lorsqu'ils étaient techniquement possibles, avec trois scénarios de prix.

Scénario 2024

Le scénario 2024 est fondé sur les prix observés en 2024, dans la cadre du tarif réglementé de vente d'électricité pour les abonnements de moins de 36 kVA. Pour la maison individuelle, l'absence de pilotage (recharge naturelle) conduit à une dépense annuelle pour la recharge du véhicule de 618 €. C'est cette somme qui sert de référence pour évaluer l'avantage apporté par le pilotage.

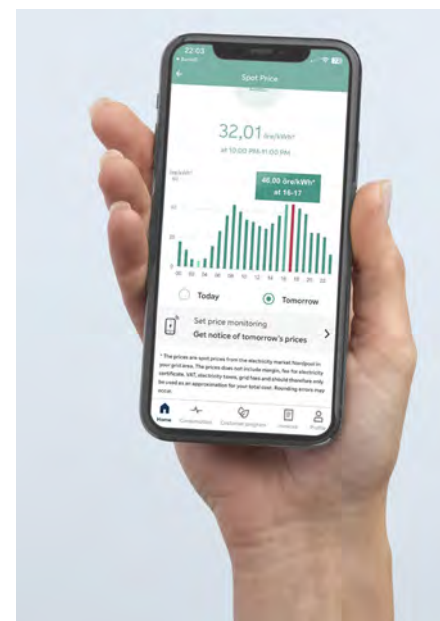


Fig. 5 : Tarification annoncée à Stockholm le 21 décembre 2023 pour le lendemain.

Scénario post 2026

Dans ce scénario, on suppose que le niveau moyen des prix reste inchangé par rapport à 2024 mais que les heures creuses sont horo-saisonnalisées, avec distinction entre les heures creuses d'hiver et les heures creuses d'été (figure 4).

Dans ce scénario, le coût associé à la recharge naturelle passe à 673 €. En effet, la recharge naturelle est encore plus désoptimisée que dans le scénario 2024 car les heures creuses démarrent plus tard dans la nuit que dans le scénario 2026.

Scénario post 2026 à tarification dynamique

Dans ce scénario, on suppose qu'est proposée par certains fournisseurs une tarification dynamique, comme il en existe dans les pays nordiques. Dans une telle tarification, les prix de l'électricité sont connus la veille pour le lendemain avec une définition au pas horaire (figure 5). Ils sont indexés sur les prix des marchés en *day-ahead*, c'est-à-dire pour le lendemain. On suppose que ●●●

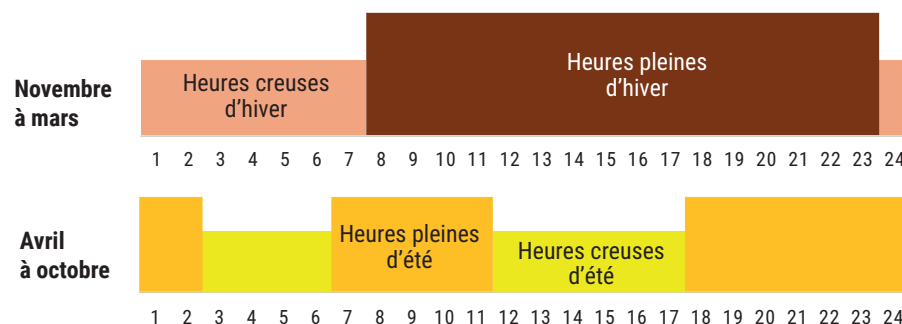


Fig. 4 : Répartition horo-saisonnalisée des heures pleines et des heures creuses dans le scénario de prix post 2026.

le fournisseur consent aux consommateurs, en contrepartie de leur acceptation du risque attaché à la tarification dynamique, une ristourne de 10 % sur le prix de fourniture de l'électricité par rapport aux tarifs statiques².

On suppose que le consommateur dispose d'un système de pilotage de la recharge lui permettant de tirer parti chaque jour des heures les plus avantageuses. On parvient ainsi à l'évolution journalière du prix des kWh utilisés pour la recharge illustrée par la figure 6.

Principaux résultats

Cas de la maison individuelle

En ce qui concerne la puissance appelée sur le réseau, les travaux récents effectués par RTE montrent que le pilotage tarifaire statique permet à lui seul de repositionner la courbe de charge liée aux véhicules électriques vers les heures où le système électrique est le moins sollicité (figure 7).

En ce qui concerne l'avantage que peut recueillir le consommateur du pilotage de la recharge, la figure 8 fait apparaître plusieurs conclusions :

- la mise en place d'une horo-saisonnalisation des heures creuses augmente le coût de la recharge en recharge naturelle mais elle accroît l'avantage apporté par les pilotages tarifaires, quels qu'ils soient ;
- le pilotage tarifaire mono-directionnel permet de réduire jusqu'à 45 % le coût moyen annuel de la recharge dans l'hypothèse d'un pilotage dynamique à pas horaire. **Les deux tiers de cet avantage (soit 30 %) peuvent être obtenus par le seul pilotage tarifaire statique ;**
- le recours au V2H peut permettre d'accroître fortement l'avantage consommateur, puisque l'optimisation porte alors sur la totalité des consommations du logement ;
- si le pilotage de la recharge en V2H est associé à la gestion des panneaux photovoltaïques, l'avantage du pilotage tarifaire peut aller jusqu'à environ 15 % de l'ensemble des consommations du logement et compenser 100 % des dépenses supplémentaires induites par le véhicule électrique ;
- le V2G peut-être envisagé dans le cadre d'opérations spécifiques.

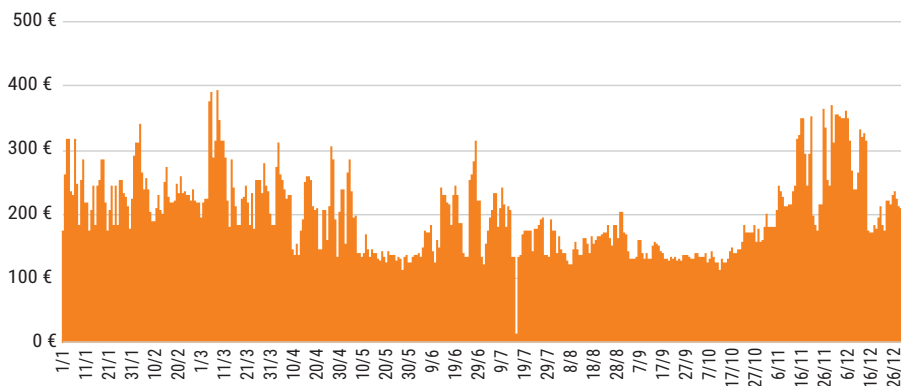


Fig. 6 : Évolution journalière du prix des kWh utilisés pour la recharge du véhicule électrique dans le scénario 3 – Prix moyen : 164 €/MWh. (année 2026 en €2024).

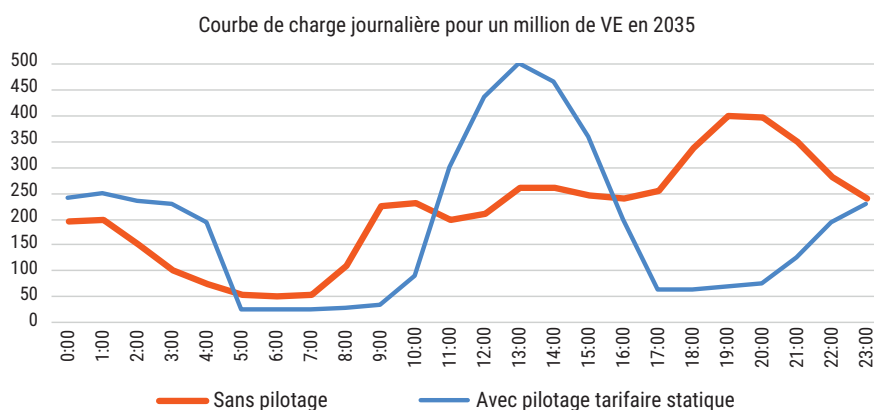


Fig. 7 : Impact du pilotage tarifaire statique sur la courbe de charge des véhicules électriques.

Source : données RTE.

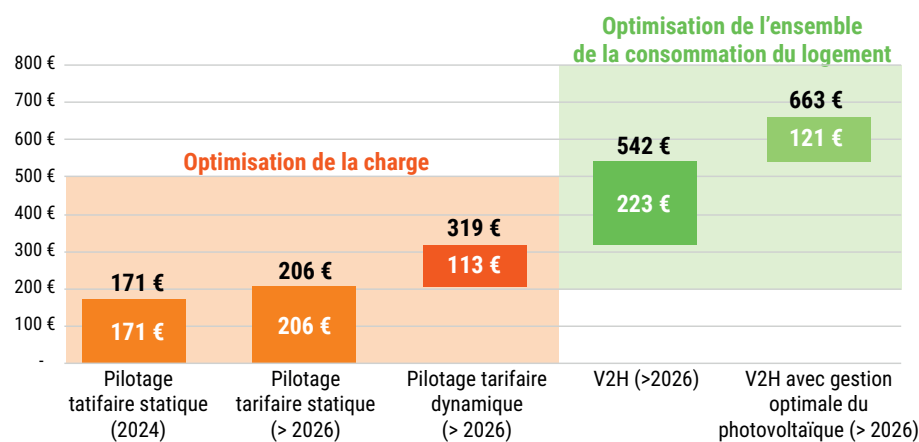


Fig. 8 : Estimation de l'avantage apporté par différentes variantes de pilotage de la recharge dans le cas d'une maison individuelle chauffée à l'électricité (en €2024).

Cependant, la matérialisation de ces avantages reste subordonnée au respect de certaines conditions :

- le pilotage doit rester simple de mise en œuvre, ce qui plaide pour une communication directe entre la borne et le compteur communicant ;

- pour le V2H et le V2G, les communications bidirectionnelles doivent être possibles entre la borne et le véhicule, ce qui conduit à recommander le respect de la norme ISO 15118-20 ;
- pour le V2H et le V2G, il convient de veiller aux questions de sécurité.

2. Cette ristourne est de l'ordre de 20 % en Suède mais avec des prix moins élevés.

Cas du résidentiel collectif et des bâtiments tertiaires ou industriels

Ces cas présentent de nombreuses spécificités. Le lecteur pourra se reporter au rapport d'étude pour prendre connaissance du détail des conclusions. On soulignera ici quelques points :

- dans le cas du résidentiel collectif, lorsque l'infrastructure de recharge constitue une extension du réseau public, il serait souhaitable de pouvoir fusionner l'abonnement lié à la borne avec celui de l'appartement pour éviter une dépense additionnelle pour le consommateur et élargir l'espace d'optimisation ;
- dans le cas où l'IRVE est gérée par un opérateur, il peut être intéressant de combiner une production d'électricité photovoltaïque et la recharge des véhicules, sous réserve que les panneaux photovoltaïques dépendent de la même personne morale que le système de recharge des véhicules. Le V2B n'a pas d'intérêt mais le V2G est susceptible de se développer ;
- **dans les cas du tertiaire ou des bâtiments industriels, la recharge en entreprise est plus avantageuse pour l'usager que la recharge à domicile. Elle l'est également pour le système électrique car elle permet d'utiliser au mieux les heures creuses diurnes.**
- dans le cas de bâtiments mono-occupants, le pilotage de la puissance est primordial. L'implémentation de stratégies de recharge en fonction des différentes catégories de véhicules permet de retarder le moment où il faudra accroître la puissance souscrite. La recharge des véhicules de service la nuit ne coûte que le prix de l'énergie car les bornes et l'abonnement servent déjà dans la journée. La présence d'une production

photovoltaïque importante peut être intégralement absorbée par la recharge des véhicules, hors week-ends. L'exploitation en V2B et, éventuellement, en V2G est à étudier.

En conclusion

En 2050, la consommation d'électricité des véhicules électriques égalera celles du seul secteur résidentiel pour le chauffage, la ventilation et l'eau chaude sanitaire. Exploiter les synergies entre véhicules électriques et bâtiments est à la fois nécessaire et bénéfique.

Nécessaire car ces synergies permettent de contenir les appels de puissance sur le système électrique et de limiter ainsi les investissements qui pourraient s'avérer nécessaires.

Bénéfique car ces synergies permettent de réaliser des réductions de coût importantes qui bénéficieront à tous les acteurs concernés et notamment au consommateur. La généralisation du pilotage tarifaire statique, très simple à mettre en œuvre comme l'est celui des ballons d'eau chaude, permettra d'abaisser les coûts de la recharge de 30 %, soit quelque 200 € par an.

Cet avantage peut être accru si sont déployées des techniques plus évoluées de pilotage dynamique, éventuellement associées à la gestion de panneaux photovoltaïques et à l'utilisation des batteries pour restituer de l'électricité à la maison ou au bâtiment (V2H/V2B). Les économies peuvent alors atteindre 670 € par an, compenser intégralement les dépenses d'électricité liées au véhicule et représenter environ 15 % d'économies sur l'ensemble des consommations du logement.

Pour mobiliser ces synergies l'étude conduit à formuler plusieurs recommandations :

Pilotage tarifaire statique

- **Le pilotage tarifaire statique doit devenir le mode de pilotage par défaut.** Il faut sensibiliser les consommateurs, dans le cadre du plan national de sobriété, et transformer en obligation réglementaire les spécifications techniques applicables aux bornes pilotables bénéficiant du crédit d'impôt.
- L'horosaisonnalisation des heures creuses renforcera l'avantage du pilotage tarifaire pour le consommateur.

- La connexion directe au compteur communicant facilitera l'appropriation par le consommateur de ce pilotage.

Pilotage dynamique et V2H

- De nouvelles formules tarifaires permettant la tarification dynamique sont à encourager, en veillant à ce qu'elles conduisent à un partage équitable de l'avantage entre système électrique et consommateur.
- Le V2H offre des perspectives intéressantes mais il faut pour cela intégrer le véhicule électrique dans le système électrique local du bâtiment et promouvoir l'adoption d'un protocole standardisé tel que le protocole unificateur Matter.
- Il faut également promouvoir le respect de la norme ISO 15118-20 par les bornes et les véhicules afin de permettre les échanges bidirectionnels.
- Acheter les études en cours sur l'impact sur les batteries de l'augmentation des cycles de charge/décharge.
- Faire connaître et faire respecter les règles de sécurité des installations.
- Définir les règles d'accès et d'usage relatives aux données des batteries.

V2G

Préparer son développement sur le moyen terme :

- suivre avec attention les premières expérimentations, menées notamment par Volkswagen, Renault, Dreeve ;
- définir les codes techniques de la réinjection sur réseaux ;
- lever les restrictions à la réinjection de l'énergie stockée (réglementation et accise).

Dans les bâtiments collectifs et les entreprises

- Encourager la recharge sur le lieu de travail. L'exonération de charges au titre des avantages en nature devrait être prolongée au-delà du 31 décembre 2024.
- En résidentiel collectif, poursuivre les études sur la faisabilité d'un abonnement commun à la borne de recharge et à l'appartement.
- Simplifier le montage des opérations d'autoconsommation collective pour coordonner la gestion de la recharge avec celle du photovoltaïque. ●

