



Berne, le 13 décembre 2024

Technologies V2X (vehicle to grid) et « smart charging ». Utiliser les batteries des véhicules électriques comme solution de stockage et d'équilibrage du réseau

Rapport du Conseil fédéral
élaboré en réponse au postulat
22.3569 Adèle Thorens Goumaz du 9 juin 2022



Table des matières

Résumé	3
1 Le postulat 22.3569	4
2 Introduction	4
3 « Smart charging » et recharge bidirectionnelle	5
3.1 Définitions	5
3.2 Potentiel du V2X	6
3.3 État de la technique	9
3.4 Projets en Suisse	9
3.5 Évolutions au niveau international	10
4 Modèles d'affaires potentiels	12
4.1 V2H/V2B : hausse de l'autoconsommation (« consommation propre ») et écrêtement des pics de charge (peak shaving)	12
4.2 V2G : flexibilité au service du réseau et du système et arbitrage de l'énergie	12
4.3 Réutilisation des batteries (deuxième vie) et recyclage	13
5 Défis techniques et défis réglementaires	13
5.1 Vieillesse des batteries et disponibilité des véhicules	13
5.2 Évolution du marché des véhicules électriques et des bornes de recharge	14
5.3 Rémunération pour l'utilisation du réseau	14
5.4 Attestations d'origine	15
5.5 Tarifs dynamiques et rémunération de la flexibilité	15
5.6 Remarques générales au sujet de la conception du marché de l'électricité	16
5.7 Technique de mesure et communication	16
5.8 Gestion des groupes-bilan	17
6 Conclusion	17

Résumé

La recharge bidirectionnelle et le « smart charging » (recharge intelligente) peuvent servir à soutenir le système énergétique en tant qu'éléments de flexibilité. Le « smart charging » vise à écrêter les pics de charge en décalant la recharge aux heures de faible sollicitation du réseau. La recharge bidirectionnelle permet en outre aux véhicules électriques de réinjecter l'énergie excédentaire dans le réseau. La réinjection, dans le réseau d'électricité, de l'énergie stockée dans les batteries des véhicules électriques peut améliorer la stabilité du réseau, ce qui réduit la nécessité d'effectuer des investissements coûteux dans des infrastructures supplémentaires ou de mettre en place des capacités de réserve additionnelles pour gérer les charges de pointe. La recharge bidirectionnelle peut être utilisée par les ménages et les communautés d'énergie pour augmenter l'autoconsommation (aussi appelée « consommation propre ») de la production photovoltaïque et écrêter les pics de charge. Ces deux technologies déchargent les réseaux en amont et le système énergétique en général. La recharge bidirectionnelle soutient l'intégration des énergies renouvelables telles que l'éolien ou le solaire en stockant temporairement l'énergie excédentaire et en la réinjectant dans le réseau en cas de besoin. La recharge aux heures de midi permet d'absorber une plus grande partie de la production photovoltaïque maximale et donc d'éviter ou du moins de réduire l'ajustement. Une partie de l'énergie temporairement stockée dans le véhicule électrique peut être réinjectée le soir et la nuit dans le réseau. Une meilleure exploitation de la production d'énergie dans les bâtiments, les sites et les entreprises ainsi que la réinjection de l'énergie excédentaire dans le réseau augmente l'efficacité de la production d'électricité renouvelable et réduit la dépendance aux importations.

La loi fédérale relative à un approvisionnement en électricité sûr reposant sur des énergies renouvelables a nettement amélioré le cadre légal par rapport à la recharge bidirectionnelle. La réglementation concernant le remboursement de la rémunération pour l'utilisation du réseau la met sur pied d'égalité avec les autres technologies de stockage. De plus, des tarifs dynamiques et la rémunération de la flexibilité peuvent améliorer la rentabilité de la recharge bidirectionnelle. Du point de vue du législateur, il faut assurer un accès équitable et non discriminatoire aux marchés de l'énergie, du réglage et de la flexibilité pour permettre la rentabilité de la recharge bidirectionnelle. Dans la mise en œuvre, ce sont notamment le pilotage, la communication, la mesure de l'électricité et le décompte qui posent des défis tant techniques que réglementaires, qui ne doivent pas être sous-estimés.

Afin que l'intégration de la mobilité électrique dans le système énergétique serve autant que possible le système et le réseau, il faut s'assurer que les véhicules électriques, lorsqu'ils ne sont pas en déplacement, soient si possible connectés en permanence au réseau électrique. Des infrastructures de recharge intelligentes et bien développées et des incitations économiques sont en outre indispensables pour favoriser une utilisation de la batterie des véhicules électriques au service du réseau et du système. Aussi bien la réduction des coûts d'extension du réseau que l'amélioration de l'intégration de la production d'électricité renouvelable présentent des avantages économiques. Alliés aux énergies renouvelables et à la transition vers un système énergétique intelligent et décentralisé, le « smart charging » et la recharge bidirectionnelle constituent des technologies clés essentielles.

1 Le postulat 22.3569

Le postulat 22.3569, intitulé « Technologies V2X (vehicle to grid) et "smart charging". Utiliser les batteries des véhicules électriques comme solution de stockage et d'équilibrage du réseau » a été déposé le 9 juin 2022 par la conseillère aux États Adèle Thorens Goumaz. Il a été adopté par le Conseil des États le 27 septembre 2022.

Texte déposé

Le Conseil fédéral montre dans un rapport de quelle manière les batteries des véhicules électriques pourraient être utilisées comme solution de stockage et d'équilibrage du réseau, ceci dans le but d'améliorer la stabilité générale de l'approvisionnement en électricité, voire de limiter le risque de pénurie d'électricité durant un certain laps de temps. Il présente l'état des connaissances et des expériences dans ce domaine, en Suisse et à l'étranger, le potentiel de ce type de solution, ainsi que les éventuels obstacles techniques, financiers, législatifs et de mise en œuvre, en proposant des pistes pour y remédier.

2 Introduction

La Suisse a inscrit l'objectif de zéro émission net d'ici à 2050 dans la loi fédérale sur les objectifs en matière de protection du climat, sur l'innovation et sur le renforcement de la sécurité énergétique (LCI). Les transports représentent aujourd'hui 33 % des émissions de gaz à effet de serre et 38 % de la consommation d'énergie. Les voitures de tourisme génèrent près de 69 % des émissions de CO₂ liées aux transports. La mobilité électrique permet de réduire de manière rapide et efficace les émissions de gaz à effet de serre de la circulation routière. En 2023, les véhicules rechargeables représentaient déjà plus de 30 % des nouvelles immatriculations. Environ 21 % sont des véhicules 100 % électriques à batterie. Près de 2 millions de véhicules électriques sillonneront les routes suisses à l'horizon 2035. Dans le même temps, les besoins en électricité de la mobilité électrique augmenteront pour atteindre 9 TWh en 2035 et 17 TWh en 2050.

Le système électrique devra à l'avenir relever les défis supplémentaires posés par la hausse de la consommation d'électricité et la forte demande en prestations de recharge. Si tous les véhicules électriques étaient chargés directement après le travail, il en résulterait rapidement des problèmes de capacité dans le réseau électrique. Le « smart charging » et la recharge bidirectionnelle permettent de piloter le processus de recharge d'une façon qui soit, dans toute la mesure du possible, au service du réseau et du système. La recharge bidirectionnelle permet même de réinjecter dans le réseau de l'électricité stockée dans la batterie des véhicules. Dans un avenir proche, plusieurs millions de véhicules électriques devraient être utilisés et la grande capacité de stockage de leurs batteries présentera par conséquent un potentiel important de stabilisation des réseaux et de soutien à l'intégration des énergies renouvelables.

Le « smart charging » et la réinjection, dans le réseau d'électricité, de l'énergie stockée dans les batteries des véhicules électriques peuvent améliorer la stabilité du réseau, ce qui réduit la nécessité d'effectuer des investissements coûteux dans des infrastructures supplémentaires ou de mettre en place des capacités de réserve additionnelles pour gérer les charges de pointe. Selon les Perspectives énergétiques 2050+, il faudra réaliser des investissements supplémentaires de près de 30 milliards de francs dans le réseau entre 2021 et 2050 pour atteindre l'objectif de zéro émission net à l'horizon 2050. Le volume d'investissements supplémentaires requis pour répondre à l'essor de l'électrification dépendra de l'évolution effective de trois éléments, à savoir la vitesse de l'électrification résultant de la multiplication des pompes à chaleur et des véhicules électriques, la rapidité avec laquelle le pilotage numérique permettra d'optimiser les processus de réseau tels que l'injection de la production locale et la consommation au service du réseau via la recharge des véhicules électriques, et enfin le rythme auquel l'efficacité énergétique s'améliorera.

Le présent rapport montre comment le « smart charging » et la recharge bidirectionnelle peuvent soutenir le système énergétique. Il présente les obstacles tant techniques que réglementaires. De plus, il

propose des pistes pour y remédier et expose à quelles conditions le « smart charging » et la recharge bidirectionnelle peuvent mis à profit de manière rentable. La nécessité d’agir sur le plan législatif au niveau de la protection des données devrait être clarifiée ultérieurement, et ce notamment en raison de la traçabilité des points de raccordement au réseau utilisés.

3 « Smart charging » et recharge bidirectionnelle

3.1 Définitions

Le « smart charging » et la recharge bidirectionnelle sont des technologies portant sur le processus de recharge d’un véhicule électrique. Par « smart charging » ou recharge intelligente, on entend des technologies et des systèmes qui optimisent la recharge des véhicules électriques en rendant le processus de recharge plus efficace, plus économique et plus écologique. Par recharge bidirectionnelle, aussi appelée « V2G » ou « vehicle-to-grid » (du véhicule au réseau), on entend une technologie qui permet aux véhicules électriques non seulement de prélever du courant du réseau électrique, mais aussi de réinjecter l’énergie excédentaire dans le réseau.

Le « vehicle-to-everything » (V2X) est un terme générique pour les technologies suivantes :

- **« Vehicle-to-home » (V2H, du véhicule à la maison)** : interaction du véhicule avec le bâtiment, principalement les logements en propriété. La batterie du véhicule est intégrée comme installation de stockage dans le réseau de la maison ;
 - **« Vehicle-to-building » (V2B, du véhicule au bâtiment)** : interaction du véhicule avec le bâtiment, principalement dans les grands ensembles de bâtiments et sur de grands sites particulièrement intéressants pour des communautés énergétiques ;
- **« Vehicle-to-grid » (V2G, du véhicule au réseau)** : interaction du véhicule avec le réseau électrique. Dans le cadre du présent rapport, les auteurs se réfèrent explicitement au réseau de distribution d’électricité public, concrètement au niveau de réseau 7. Les connexions au réseau d’un bâtiment ou au réseau d’une communauté énergétique relèvent du « vehicle-to-home » ou du « vehicle-to-building » ;
- **« Vehicle-to-load » (V2L, véhicule pour recharge)** : connexion du véhicule à un appareil consommateur. L’électricité stockée dans le véhicule alimente un appareil.
 - **« Vehicle-to-vehicle » (V2V, de véhicule à véhicule)** : interaction du véhicule avec un autre véhicule pour la recharge.

Ce sont essentiellement les connexions du véhicule au réseau public, au réseau privé d’une maison ou au réseau privé d’un bâtiment qui sont examinées dans le présent rapport. Toutes les technologies V2X nécessitent une recharge bidirectionnelle, autrement dit que l’électricité puisse circuler dans deux sens : du réseau au véhicule (recharge de la batterie) et du véhicule au réseau (décharge de la batterie).

Le « smart charging » ne requiert pas de recharge bidirectionnelle, mais décrit un pilotage « intelligent » du processus de recharge. La recharge bidirectionnelle et le « smart charging » nécessitent que les processus de recharge et de décharge soient pilotés par une instance supérieure, qui peut être l’ordinateur de bord du véhicule ou la borne de recharge, mais aussi le système de gestion de l’énergie du bâtiment ou le gestionnaire de réseau de distribution. Les technologies de recharge sont toujours tributaires de la communication de données.

Les technologies définies ci-dessus, notamment V2X, sont aussi utilisées en lien avec la télématique des transports. Cette notion recouvre la communication de véhicule à X, aussi appelée communication de véhicule à tout (vehicle-to-everything, V2X), la communication de véhicule à véhicule (vehicle-to-vehicle, V2V), la communication de véhicule à infrastructure (vehicle-to-infrastructure, V2I) ou la communication de véhicule à réseau (vehicle-to-network, V2N). Dans le présent rapport, V2X se réfère au flux d’électricité lors des processus de recharge.

3.1.1 « Vehicle-to-home » (V2H, du véhicule à la maison) et « vehicle-to-building » (V2B, du véhicule au bâtiment)

Les véhicules privés restent stationnés la plupart du temps. Ils peuvent servir de batterie stationnaire lorsqu'ils sont raccordés à une borne de recharge bidirectionnelle. Dans une maison individuelle équipée d'une installation photovoltaïque, par exemple, l'électricité produite aux heures de midi peut ainsi être stockée temporairement durant la journée dans la batterie du véhicule et réinjectée le soir et la nuit dans le réseau de la maison. Le stockage et la réinjection peuvent augmenter l'autoconsommation (« consommation propre »), réduire les pics d'injection et les pics de charge, ce qui déleste le réseau de distribution.

Les solutions techniques du « vehicle-to-home » et du « vehicle-to-building » sont disponibles depuis quelques années. Les bornes de recharge bidirectionnelle sont cependant encore relativement chères et il n'y a guère de véhicules électriques compatibles avec la recharge bidirectionnelle sur le marché. La recharge bidirectionnelle peut néanmoins déjà être intéressante pour les propriétaires d'un bâtiment équipé d'une installation photovoltaïque qui souhaitent augmenter l'autoconsommation (« consommation propre »).

3.1.2 « Vehicle-to-grid » (V2G, du véhicule au réseau)

La technologie du véhicule au réseau nécessite également une borne de recharge bidirectionnelle et un véhicule électrique compatible. La seule différence avec le « vehicle-to-home » et le « vehicle-to-building » consiste en la réinjection dans le réseau électrique public. Celle-ci est en général assortie de conditions étant donné que des règles spéciales s'appliquent à la réinjection dans ce réseau-là. Comme le gestionnaire du réseau de distribution n'a pas d'obligation générale de reprendre l'énergie injectée, il faut, le cas échéant, trouver un repreneur. Si des modèles d'affaires concrets de reprise d'électricité n'existent pas encore en Suisse, ils ont été analysés dans différents projets pilotes.

3.2 Potentiel du V2X

Développement de la mobilité électrique

La mobilité électrique a connu une très forte dynamique ces dernières années. En 2023, les véhicules rechargeables représentaient déjà plus de 30 % des nouvelles immatriculations en Suisse (21 % de véhicules 100 % électriques et 9 % d'hybrides rechargeables) et 3,7 % du parc automobile. Les hybrides rechargeables (plug-in) ne jouent qu'un rôle mineur pour le présent rapport : ils ne sont en général pas compatibles avec la recharge bidirectionnelle en raison de normes de recharge différentes. Les prévisions tablent sur plus de deux millions de véhicules électriques sur les routes suisses à l'horizon 2035. Le parc automobile devrait être largement électrifié en 2050. L'autonomie des véhicules électriques n'a cessé de s'améliorer ces dernières années grâce à des batteries plus grandes. Des batteries d'une capacité supérieure à 100 kilowattheures (kWh) sont devenues courantes. Si l'on prend pour base de calcul une capacité de batterie moyenne de 60 kWh par véhicule électrique en 2035, deux millions de véhicules électriques représentent une capacité totale de 120 gigawattheures (GWh), ce qui correspond à près de la moitié de l'énergie maximale utilisable que contiennent au total les centrales suisses de pompage-turbinage. Comme les véhicules électriques servent en premier lieu à la mobilité et qu'ils ne seront peut-être pas tous compatibles avec la recharge bidirectionnelle, seule une petite partie du parc automobile électrique pourra être utilisé pour soutenir le système énergétique. La capacité de stockage est néanmoins considérable. Une centaine de milliers de véhicules électriques équipés de la technologie « vehicle-to-grid » pourraient déjà en théorie injecter rapidement dans le réseau une puissance équivalant à celle de la centrale nucléaire de Leibstadt (1220 mégawatts de puissance électrique nette)¹. Les transports publics présentent aussi un potentiel en la matière en raison de l'électrification rapide des bus pour s'affranchir du diesel. Même si ces véhicules sont nettement plus souvent en service que les voitures, la planification de leur utilisation et le stockage de réserves pourraient cependant ouvrir des champs d'activité intéressants.

¹ 11 kilowatts de puissance de recharge/décharge et 100 000 véhicules permettent d'obtenir une puissance totale de 1100 mégawatts. S'il est possible d'utiliser 30 kilowattheures de la batterie, cette puissance est disponible pour plus de deux heures.

La capacité de stockage et la puissance rendues disponibles par la recharge bidirectionnelle pour soutenir le système énergétique sont tributaires de l'évolution technologique et de la volonté des propriétaires de véhicules électriques de procéder aux équipements nécessaires à la recharge bidirectionnelle. L'utilisation de son véhicule pour la recharge bidirectionnelle, et la façon de le faire, dépend grandement des avantages économiques qu'il est possible d'en tirer. Il est important que la recharge bidirectionnelle soit simple à utiliser et qu'elle ne restreigne pas l'usage du véhicule (disponibilité) pour les déplacements.

Augmentation de l'autoconsommation (« consommation propre ») et décharge du réseau électrique

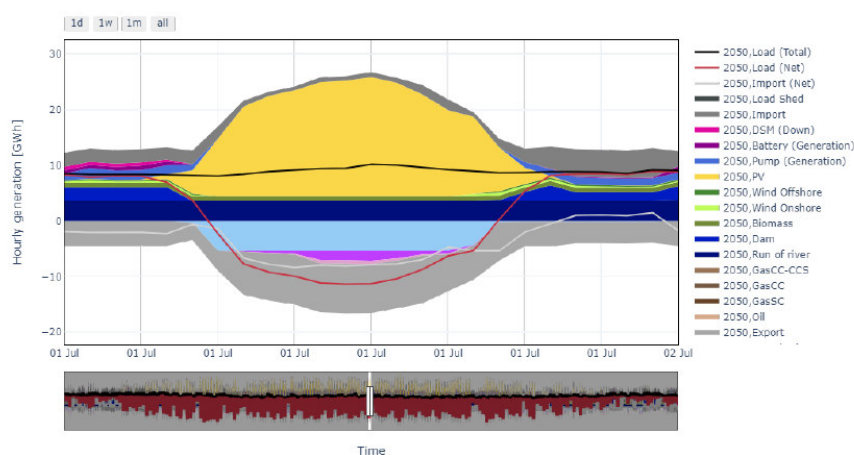
Le « vehicle-to-home » et le « vehicle-to-building » permettent d'augmenter l'autoconsommation (« consommation propre ») d'électricité produite par une installation photovoltaïque et de lisser les pics de consommation, ce qui réduit les coûts d'électricité. Dans le même temps, ces technologies déchargent les réseaux en amont, notamment le réseau de distribution. La flexibilité offerte par le « vehicle-to-grid » peut décharger les réseaux de distribution dans une mesure similaire. Le gestionnaire du réseau de distribution gère la flexibilité, ce qui permet de retarder l'extension du réseau ou de procéder à un renforcement moins conséquent du réseau. L'étude sur les réseaux de distribution menée par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) indique les avantages pour l'économie suisse.² L'utilisation intelligente de la flexibilité et de la recharge au service du réseau peut réduire les investissements requis dans une proportion allant jusqu'à 40 %.

La flexibilité offerte par la recharge bidirectionnelle peut aussi être utilisée à des niveaux plus élevés, par exemple pour les services-système, qui sont chargés de maintenir en permanence l'équilibre entre la production et la consommation dans le réseau électrique. Techniquement capable de réagir très vite, le « vehicle-to-grid » peut servir de réserve de puissance de réglage. Les fluctuations imprévues du réseau électrique peuvent ainsi être compensées rapidement.

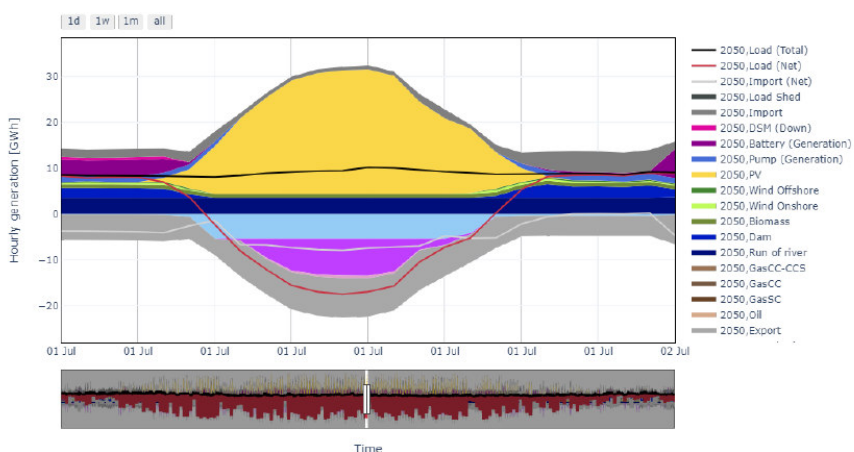
Intégration des énergies renouvelables

L'intégration des énergies renouvelables dans le système énergétique gagne en importance au vu de l'essor qu'elles connaissent. Les objectifs de développement concernant ces énergies, objectifs définis dans la loi fédérale relative à un approvisionnement en électricité sûr reposant sur des énergies renouvelables, entraîneront notamment une hausse de la production photovoltaïque d'électricité aux heures de midi. La mobilité électrique peut contribuer à mieux intégrer une partie de ces pics de production photovoltaïque dans le système électrique par le « smart charging » des véhicules en priorité à ces heures-là. Le soir et la nuit, une partie de l'énergie temporairement stockée dans la batterie du véhicule électrique peut être réinjectée dans le réseau. Elle peut également être utilisée pour approvisionner son propre logement, un grand ensemble de bâtiments ou un grand site, permettant d'intégrer davantage d'électricité solaire dans le système électrique.

² www.ofen.admin.ch > Actualités et médias > Communiqués de presse > Les effets de l'électrification et de l'essor des énergies renouvelables sur les réseaux de distribution d'électricité suisses. Berne, 30.11.2022 (étude en allemand avec résumé en français)



(a) Without V2G integration



(b) With V2G integration

Figure 1 : production et courbe de charge d'une journée d'été typique en 2050. V2G permet de mieux intégrer les énergies renouvelables en évitant des ajustements, ce qui diminue aussi les importations la nuit. (Source ETH Zürich, Nexus-G)

L'étude « Vehicle-to-grid in Switzerland ». A first estimate of the value of vehicle-to-grid for the Swiss electric system » réalisée par l'EPFZ en 2023³ a examiné l'importance de la recharge bidirectionnelle pour le système électrique suisse. Elle a envisagé différents scénarios, notamment sur l'évolution des prix de l'électricité et du gaz, mais aussi sur la pénétration du marché de la mobilité électrique. Les simulations montrent que la recharge bidirectionnelle permet d'améliorer nettement l'utilisation de l'électricité issue des énergies renouvelables et de réduire l'ajustement du photovoltaïque aux heures de pointe. Le stockage intermédiaire au moyen du « vehicle-to-grid » améliore aussi l'exploitation des différences de prix sur le marché (arbitrage), ce qui évite ou réduit les importations aux heures de prix élevés sur le marché et optimise les exportations. La recharge bidirectionnelle contribue aussi à éviter le recours aux centrales fonctionnant aux énergies fossiles et à l'importation d'électricité à forte intensité carbone lorsque la production d'électricité issue des énergies renouvelables ne suffit pas.

La figure 1 montre une journée d'été typique en 2050 sans (a) et avec (b) recharge bidirectionnelle. Dans l'illustration (b), la production photovoltaïque est nettement plus élevée, car si les batteries des véhicules sont rechargées pendant les heures de midi il y a moins d'ajustements à effectuer. La réinjection de l'électricité qui était stockée dans les batteries des véhicules diminue en outre considérablement les importations la nuit.

³ EPFZ (2023) : Vehicle-to-grid in Switzerland. A first estimate of the value of vehicle-to-grid for the Swiss electric system.

Une étude similaire⁴ portant sur le territoire européen parvient à la conclusion que la recharge bidirectionnelle permettrait d'économiser plus de 8 % des coûts annuels du système énergétique.

3.3 État de la technique

La recharge bidirectionnelle est une technologie mûre commercialisée depuis plusieurs années. Elle ne s'est néanmoins pas encore imposée pour plusieurs raisons : le manque de normes, la non-interopérabilité, la rareté des modèles de véhicules compatibles avec la recharge bidirectionnelle et la cherté des infrastructures de recharge bidirectionnelle par rapport aux infrastructures traditionnelles. Début 2024, il n'y avait sur le marché que quatre modèles de véhicules entièrement compatibles avec la recharge bidirectionnelle (« vehicle-to-grid ») produits par des constructeurs asiatiques. D'autres constructeurs ont mis sur le marché des modèles disposant d'une fonctionnalité limitée de recharge bidirectionnelle (« vehicle-to-load » et « vehicle-to-home »).

Seul un petit nombre de modèles utilisent la norme de recharge CCS⁵ répandue en Europe, la plupart utilisent CHAdeMO⁶. Toutes les bornes de recharge bidirectionnelle commercialisées sont à courant continu et ont une puissance de recharge de 5 à 11 kilowatts. Avec des prix compris entre 4000 et 15 000 francs, elles sont environ cinq à dix fois plus chères que les bornes de recharge traditionnelles. Certains constructeurs ont aussi annoncé une fonction bidirectionnelle en courant alternatif au moyen d'un chargeur embarqué. Il n'y a cependant aujourd'hui aucun modèle de véhicule qui propose la technologie « vehicle-to-grid » en courant alternatif sur le marché. L'utilisation du courant alternatif permettrait de raccorder le véhicule électrique directement au réseau électrique sans passer par une borne de recharge.

3.4 Projets en Suisse

Différents projets d'utilisation de la recharge bidirectionnelle à domicile, dans des zones d'habitation et sur des sites ont été menés en Suisse. Le « vehicle-to-building » a déjà été testé en 2020 à Bâle sur le site d'Erlenmatt-Ost organisé en « regroupement dans le cadre de la consommation propre » (RCP), qui dispose de son propre réseau approvisionné en électricité solaire. Ce projet soutenu par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN)⁷ a montré que deux véhicules électriques à recharge bidirectionnelle permettent déjà d'augmenter l'autoconsommation (« consommation propre ») du site et de réduire les pics de charge le soir (figure 2).



Figure 2 : courbe de charge à Erlenmatt-Ost un jour de mars. Une partie de l'électricité photovoltaïque qui n'est pas consommée l'après-midi est temporairement stockée dans les batteries des véhicules (flèche verte) et réinjectée le soir, ce qui réduit le soutirage sur le réseau externe (flèche rouge). Source : article spécialisé publié par l'OFEN⁸

L'écêtement des pics de charge en particulier est financièrement intéressant; il a permis de réduire considérablement le tarif de la puissance si l'on se réfère au pic de soutirage mensuel.

⁴ Kühnbach et al: Potential of a full EV-power-system-integration in Europe and how to realise it. Fraunhofer Institute (ISE & ISI), 2024.

⁵ Combined Charging System (système de recharge combiné, CCS) : norme internationale relative à la recharge des véhicules électriques permettant à la fois la recharge en continu et la recharge en courant alternatif

⁶ CHAdeMO est une norme de recharge surtout répandue au Japon qui est de moins en moins utilisée en Europe et aux États-Unis.

⁷ Projet « Mobilité smart du covoiturage et de l'autopartage électromobile et V2X bidirectionnel ». Le rapport final et l'article spécialisé se trouvent dans la banque de données de la Confédération ARAMIS (Administration Research Actions Management Information System). Numéro de projet SI/501837.

⁸ Benedikt Vogel sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) : Véhicules électriques et accumulateur tampon en un. Blog Energiea, 19 avril 2022. La version française de l'article se trouve dans la banque de données ARAMIS, Numéro de projet SI/501837.

Dans le projet V2X Suisse⁹, 50 véhicules électriques à recharge bidirectionnelle ont rejoint la flotte du prestataire d'autopartage Mobility. Différents modèles d'affaires ont été étudiés dans ce cadre, notamment l'augmentation de l'autoconsommation (« consommation propre ») dans les RCP, l'utilisation au service du réseau par les gestionnaires de réseau de distribution et la fourniture de services-système. Dans ce dernier cas, un agrégateur a regroupé plusieurs véhicules électriques pour les mettre en réserve comme puissance de réglage primaire pour la stabilisation de la fréquence. Techniquement capables de réagir très vite, les véhicules électriques à recharge bidirectionnelle regroupés se sont préqualifiés pour la fourniture de puissance de réglage primaire auprès de Swissgrid. Un projet similaire à Yverdon¹⁰ teste l'utilisation de véhicules à recharge bidirectionnelle dans un microgrid équipé de photovoltaïque pour étudier notamment les tarifs spécifiques à la recharge et les modèles d'affaires. Les Chemins de fer fédéraux (CFF) examinent dans le cadre du projet BIENE¹¹ comment la recharge bidirectionnelle peut augmenter la durée de vie des batteries et soutenir le réseau de courant de traction lors de l'électrification des véhicules ferroviaires. D'autres études ont montré que des tarifs spécifiques^{12,13} peuvent motiver les propriétaires de véhicules à adopter un nouveau comportement de recharge qui soit au service du réseau, mais que cela nécessite aussi un changement d'attitude en profondeur¹⁴.

3.5 Évolutions au niveau international

La recharge bidirectionnelle a connu un développement très différent selon les pays en raison de la spécificité de leurs systèmes énergétiques et des conditions qui y règnent. Cette technologie n'a pas réussi jusqu'à présent à percer sur le marché. La mise à disposition de véhicules électriques à recharge bidirectionnelle, la réduction des coûts de l'infrastructure de recharge, les normes internationales ainsi que des conditions-cadres réglementaires appropriées (comme des avancées dans le déploiement de compteurs intelligents, un marché de l'électricité plus ouvert, une réglementation du réseau basée sur des incitations) sont déterminantes pour la poursuite de la diffusion de la recharge bidirectionnelle.

Certains pays ont toutefois déjà enregistré des évolutions notables qui pourraient aussi être pertinentes en Suisse. Après la crise énergétique mondiale déclenchée par la guerre en Ukraine, les véhicules électriques ont gagné en importance comme groupes électrogènes de secours, notamment dans les territoires où la sécurité d'approvisionnement est moins élevée. Aux États-Unis par exemple, la fonction de recharge « vehicle-to-load » constitue désormais un important argument de vente pour les grands véhicules électriques.

Union européenne

L'Union européenne (UE) a proposé des mesures visant à promouvoir la diffusion de la technologie « vehicle-to-grid » dans le « Clean Energy Package 2019 » (« Une énergie propre pour tous les Européens ») et le paquet législatif « Ajustement à l'objectif 55 », adopté en 2023. En font partie les mesures contre la double rémunération pour l'utilisation du réseau grevant les installations de stockage, l'acquisition basée sur le marché des prestations de flexibilité ainsi que des plans stratégiques nationaux spécifiques afin de tenir compte des bornes de recharge bidirectionnelle lors du développement des infrastructures de recharge. Ces changements législatifs ont créé en général des conditions-cadres favorables. L'avancement de la mise en œuvre est toutefois très différent dans chaque État membre.¹⁵

⁹ Projet « V2X Suisse ». Le rapport final se trouve dans la banque de données de la Confédération ARAMIS (Administration Research Actions Management Information System). Numéro de projet SI/502316

¹⁰ Projet « Démonstrateur du potentiel d'un microgrid pour l'intégration optimisée de productions décentralisées et mobilité électrique du futur dans l'approvisionnement électrique d'un parc industriel ». Le rapport final se trouve dans la banque de données de la Confédération ARAMIS (Administration Research Actions Management Information System). Numéro de projet SI/502157

¹¹ Projet « BIENE – BatteriEschwarm im BahnstromNEt - cost and benefit-optimised control of batteries on rail vehicles ». Le rapport final se trouve dans la banque de données de la Confédération ARAMIS (Administration Research Actions Management Information System). Numéro de projet SI/502595

¹² Projet « NETFLEX – Effiziente Netzentgelte für flexible Verbraucher ». Le rapport final se trouve dans la banque de données de la Confédération ARAMIS (Administration Research Actions Management Information System). Numéro de projet SI/501899

¹³ Projet « IncentV2G – Analyse des Effektes von Anreizen für effiziente Netzintegration von Elektrofahrzeugen » (analyse des effets des incitations pour une intégration efficace des véhicules électriques dans le réseau). Le rapport final se trouve dans la banque de données de la Confédération ARAMIS (Administration Research Actions Management Information System). Numéro de projet SI/502345

¹⁴ Christine Gschwendtner, Simon R. Sinsel, Annegret Stephan : Vehicle-to-X (V2X) implementation: An overview of predominate trial configurations and technical, social and regulatory challenges. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 145, July 2021, 110977.

¹⁵ European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators (Agence de coopération des régulateurs de l'énergie, ACER) : Demand response and other distributed energy resources: what barriers are holding them back? 2023 Market Monitoring Report. 19 December 2023.

Allemagne

Le gouvernement fédéral allemand s'est fixé dans le « Masterplan Ladeinfrastruktur II » (un plan directeur sur l'infrastructure de recharge) comme objectif que la flexibilité offerte par la mobilité électrique et les possibilités qu'elle génère du point de vue économique dans le domaine énergétique peuvent et doivent être mises au service du système électrique, notamment via la recharge bidirectionnelle. L'Allemagne mène des réflexions similaires à celles de la Suisse quant aux mesures à prendre pour éviter la double rémunération pour l'utilisation du réseau et les taxes supplémentaires imposées aux installations de stockage. Avec la « doppelte gewillkürte Vorrangregelung », les installations de stockage avec consommation finale sont mises sur pied d'égalité avec des installations servant uniquement au stockage sur le réseau. Il reste néanmoins aussi des incertitudes concernant la mise en œuvre, en particulier concernant la mesure de l'électricité.

Pays-Bas

Les Pays-Bas comptent parmi les champions européens des infrastructures de recharge avec plus de 120 000 points de recharge publics. Un des plus grands essais sur le terrain de « vehicle-to-grid » au monde a débuté à Utrecht en 2022. L'entreprise We drive solar y propose aux habitants des véhicules en autopartage. Ce test a pour objectif d'améliorer l'intégration dans le système du photovoltaïque et d'éviter un développement inutile du réseau.

Grande-Bretagne

La Grande-Bretagne promeut systématiquement la recharge bidirectionnelle et les travaux législatifs y sont déjà bien avancés. Le gouvernement britannique a défini les conditions-cadres du « vehicle-to-grid » dans le document « Delivering a smart and secure electricity system » (mise en place d'un réseau électrique intelligent et sûr). Une vingtaine de projets ont reçu un soutien financier de plus de 30 millions de livres. Un premier produit commercial a été mis sur le marché : « Octopus Power Pack ». Ce tarif permet de recharger gratuitement le véhicule électrique lorsque le prestataire peut utiliser en contrepartie la batterie du véhicule pour le « vehicle-to-grid ».¹⁶ Dans l'ensemble, le système énergétique en Grande-Bretagne est centralisé et régulé selon une approche de haut en bas (« top-down »). Contrairement à la Suisse, le marché de l'électricité est entièrement libéralisé et compte, outre un fournisseur de réseau de transport national d'électricité, seulement 14 gestionnaires de réseau de distribution détenus par six entreprises. Le déploiement des compteurs intelligents est pratiquement terminé et le pilotage intelligent des bornes de recharge est obligatoire.

États-Unis

Le ministère de l'énergie américain a signé avec des entreprises clés une déclaration d'intention visant à mettre en œuvre la recharge bidirectionnelle, qui indique notamment que les véhicules électriques à recharge bidirectionnelle ont le potentiel d'améliorer la sécurité énergétique du pays, la vitalité de l'économie et la qualité de la vie.¹⁷ Les réseaux électriques atteignent régulièrement leurs limites dans un grand nombre de régions des États-Unis, ce qui offre de bonnes conditions à des prestations de flexibilité lucratives. Ce sont le plus souvent des bus scolaires qui ont été utilisés à cette fin jusqu'ici. En effet, ils sont en service environ 5 heures sur 24 près de 200 jours par an. Le reste du temps, leurs grandes batteries d'une capacité de 200 à 300 kWh peuvent servir à stabiliser le réseau. San Diego Gas & Electric paie l'énergie injectée jusqu'à deux dollars américains par kWh.¹⁸ Un marché intéressant s'ouvre actuellement aux grands véhicules électriques à recharge bidirectionnelle tels que la Ford F150 équipée d'une batterie de 130 kWh, qui peuvent être utilisés comme groupes électrogènes de secours au moyen du « vehicle-to-home ».

Japon

¹⁶ Octopus Power Pack : le premier tarif britannique pour le « vehicle-to-grid ». <https://octopus.energy/power-pack>

¹⁷ U.S. Department of Energy, Office of Electricity : DOE and partners sign Vehicle-to-Everything MOU. April 21, 2022.

¹⁸ San Diego Gas & Electric Company : SDG&E and Cajon Valley Union School District Flip the Switch on Region's First Vehicle-to-Grid Project. www.sempira.com > July 26, 2022.

C'est au Japon que la recharge bidirectionnelle a été utilisée pour la première fois à grande échelle. Après le séisme de Tōhoku qui a provoqué la catastrophe nucléaire de Fukushima en 2011, la norme de recharge japonaise CHAdeMO a intégré la bidirectionnalité en vue d'utiliser les véhicules électriques pour l'alimentation électrique de secours sous deux formes : en soutien direct des consommateurs au moyen du « vehicle-to-load » et comme centrale virtuelle regroupant plusieurs véhicules électriques avec le « vehicle-to-grid ».

4 Modèles d'affaires potentiels

Dans toutes les possibilités d'utilisation de la recharge bidirectionnelle et du « smart charging », les coûts d'investissement et les coûts d'exploitation doivent être mis en regard des revenus potentiels. Les coûts d'investissement comprennent les coûts d'une borne de recharge intelligente ou bidirectionnelle ainsi que de son installation et de sa possible intégration dans un système de gestion de l'énergie. Les coûts d'exploitation se limitent pour l'essentiel à la maintenance, aux coûts de mesure, aux services de décompte et, le cas échéant, aux redevances de licences pour le logiciel. Certains modèles d'affaires possibles sont présentés ci-après.

4.1 V2H/V2B : hausse de l'autoconsommation (« consommation propre ») et écrêtement des pics de charge (peak shaving)

Dans le domaine privé, un véhicule électrique et une installation de stockage stationnaire peuvent être intégrés dans le réseau du bâtiment, ce qui permet d'augmenter l'autoconsommation (« consommation propre ») de la production photovoltaïque et de réduire les pics de soutirage sur le réseau. Une possibilité de revenus résulte des coûts réduits en cas de soutirage d'électricité provenant du réseau du gestionnaire du réseau de distribution. Il convient d'évaluer au cas par cas si la solution la plus rentable est une batterie stationnaire ou une recharge bidirectionnelle. La recharge bidirectionnelle n'est judicieuse que si le véhicule électrique est raccordé la plupart du temps au réseau de la maison ou du bâtiment, notamment lors des pics de production photovoltaïque et des pics de charge. La probabilité qu'un véhicule électrique soit toujours raccordé au réseau et puisse être utilisé est plus élevée dans les collectivités d'énergie disposant de plusieurs véhicules rechargeables. Les possibilités de revenus dépendent de la réduction effective du soutirage sur le réseau et de la différence entre le tarif de soutirage fixé par le gestionnaire du réseau de distribution et la rémunération obtenue pour l'injection de l'autoproduction de l'installation photovoltaïque. Avec les tarifs liés aux prestations, l'écrêtement des pics de charge (peak shaving) donne une possibilité de revenus supplémentaires.

4.2 V2G : flexibilité au service du réseau et du système et arbitrage de l'énergie

Utilisation de la flexibilité au service du réseau

Un pilotage du processus de recharge au service du réseau est possible uniquement avec le « smart charging ». Des incitations à la recharge intelligente sont données p. ex. avec les tarifs variables en fonction des heures (comme le tarif haut et le tarif bas). Dans ce contexte, la recharge est alors facturée à un tarif plus élevé aux heures où le réseau est le plus sollicité. Avec des tarifs dynamiques ou variables en fonction des heures, il est possible de configurer la borne de recharge pour ne recharger le véhicule qu'aux heures à bas tarif. Par ailleurs, le pilotage de la flexibilité peut être confié au gestionnaire du réseau de distribution ou à un tiers. En cas de besoin, le « smart charging » peut réduire la charge sur le réseau de distribution. La recharge bidirectionnelle permet d'injecter de l'énergie supplémentaire dans le réseau. Une rémunération pour l'utilisation de la flexibilité doit faire l'objet d'un contrat avec le gestionnaire du réseau de distribution ou un tiers ou peut être indemnisée par des tarifs spéciaux. Des revenus peuvent être principalement tirés de l'utilisation d'un tarif visant à optimiser les coûts de la recharge et d'une rémunération de l'accès direct à la flexibilité.

Utilisation de la flexibilité au service du système

Le projet pilote V2X Suisse a montré que la flexibilité offerte par le « vehicle-to-grid » peut très vite être utilisée et que les critères techniques de participation au marché de puissance de réglage primaire sont ainsi remplis. Les batteries sont idéales à cette fin puisqu'il faut constituer une réserve symétrique

de puissance positive et de puissance négative. Si la puissance d'un seul véhicule électrique est trop faible pour participer au marché, celle de parcs de véhicules électriques regroupés par des agrégateurs peut en revanche être commercialisée. Un grand nombre de véhicules électriques regroupés peut garantir en permanence la disponibilité d'une puissance ou d'une charge définie. Le marché de la puissance de réglage primaire est lucratif, mais relativement petit, ce qui risquerait d'entraîner des effets de saturation en cas de hausse du nombre de véhicules électriques. Toutefois, les batteries peuvent en principe aussi être utilisées pour conserver de la puissance de réglage secondaire ou tertiaire. Par ailleurs, l'essor des énergies renouvelables accroît les besoins en énergie de réglage.

Arbitrage de l'énergie

Outre la mise à disposition de flexibilité, le stockage intermédiaire d'énergie à court et moyen terme dans les batteries des véhicules électriques est la principale application à long terme du point de vue économique dans le domaine énergétique. Le stockage intermédiaire d'énergie peut essentiellement être monétisé de deux façons. Une variante est offerte par les tarifs énergétiques dynamiques ou variables en fonction des heures, autant pour le soutirage que pour l'injection d'énergie. La rémunération résulte de la différence entre les coûts du soutirage et la rémunération de l'injection. Si les coûts du réseau sont remboursés, ils n'entrent pas en ligne de compte. Par analogie à la participation au marché de l'énergie de réglage, des parcs de véhicules électriques regroupés par un agrégateur pourraient être commercialisés à la bourse de l'énergie. L'agrégateur rémunérerait alors les propriétaires des véhicules électriques pour l'utilisation des batteries. Dans ce genre d'application, on pourrait parler d'utilisation au service du marché, étant donné qu'elle permet d'augmenter l'efficacité du marché de l'énergie, ce qui devrait en fin de compte faire baisser les prix pour les consommateurs.

4.3 Réutilisation des batteries (deuxième vie) et recyclage

La fabrication des batteries des véhicules électriques est un processus énergivore consommant beaucoup de ressources. La batterie est en règle générale le composant le plus cher d'un véhicule électrique. Les batteries modernes disposent aussi d'une capacité résiduelle suffisante après plusieurs centaines de milliers de kilomètres. La batterie d'un véhicule électrique appartenant à un particulier ne doit pour ainsi dire jamais être remplacée. Si elle est, en sus, utilisée pour la recharge bidirectionnelle, cela augmente son utilité totale. Il n'en va pas de même pour les véhicules utilitaires parcourant chaque jour beaucoup de kilomètres comme les bus et les camions électriques. Leurs anciennes batteries dont la capacité est réduite peuvent encore convenir à des applications stationnaires (réutilisation, deuxième vie). Certaines entreprises de transport urbain prévoient déjà de donner une deuxième vie aux batteries en les utilisant comme installations de stockage pour le photovoltaïque. Si une deuxième vie n'est pas judicieuse, le recyclage permet de récupérer les composants précieux de la batterie. En Suisse, les principaux acteurs travaillant le long de la chaîne de création de valeurs, qui va de la production au recyclage de batteries, se sont regroupés au sein de l'organisation iBAT¹⁹. Beaucoup participent aussi déjà au projet CircuBAT²⁰ portant sur le développement de l'économie circulaire pour les batteries des véhicules électriques.

5 Défis techniques et défis réglementaires

5.1 Vieillesse des batteries et disponibilité des véhicules

Les flux de recharge et de décharge lors de la recharge bidirectionnelle sont très faibles par rapport à ceux qui surviennent lors de la recharge rapide ou de la conduite. La batterie n'est en outre utilisée que dans une fourchette optimale comprise entre 30 et 70 % de sa capacité. Par conséquent, il ne faut pas s'attendre à un vieillissement anticipé notable de la batterie dans la mesure où les processus de recharge sont pilotés de manière optimale.²¹ La disponibilité du véhicule est, elle aussi, importante pour les utili-

¹⁹ iBAT Association. <https://ibat.swiss>

²⁰ CircuBAT. Batteries lithium-ion. CircuBAT Project. <https://circubat.ch>

²¹ Christoph Gehbauer, Douglas R. Black, Peter Grant: Advanced control strategies to manage electric vehicle drivetrain battery health for Vehicle-to-X applications. In: Applied Energy, Volume 345, 1 September 2023, 121296.

sateurs de la recharge bidirectionnelle. Un pilotage intelligent doit garantir qu'il reste toujours suffisamment de capacité résiduelle pour la conduite. De bons algorithmes permettent d'optimiser l'utilisation de la recharge bidirectionnelle au moyen d'un profil type de conduite. Si nécessaire, il est bien sûr aussi possible de reprendre le contrôle de la recharge bidirectionnelle pour forcer la recharge complète de la batterie. Même si les longs temps de stationnement permettent d'utiliser en sus la batterie du véhicule électrique pour la recharge directionnelle, il ne faut pas oublier que la grande majorité des personnes achètent un véhicule électrique dans l'intention de l'utiliser pour se déplacer. L'utilisation de la batterie pour la recharge bidirectionnelle doit donc toujours être considérée comme secondaire et ne doit pas restreindre l'usage du véhicule (disponibilité) pour les déplacements. Il convient aussi de prendre en considération les réticences de la population par rapport au vieillissement prématuré de la batterie et à la non-disponibilité du véhicule comme on le fait pour ses réticences par rapport à l'autonomie du véhicule.

5.2 Évolution du marché des véhicules électriques et des bornes de recharge

Il n'y a aujourd'hui que très peu de modèles de véhicules sur le marché qui soient compatibles avec la recharge bidirectionnelle. D'anciens modèles asiatiques utilisent la norme de recharge japonaise CHAdeMO alors que la norme de recharge CCS s'est imposée sur le marché européen. Même les constructeurs asiatiques utilisent désormais la norme CCS pour leurs nouveaux modèles de véhicules vendus sur le marché européen. Au début, seuls Nissan et Mitsubishi proposaient des véhicules électriques à recharge bidirectionnelle. Entre-temps, d'autres constructeurs comme Volkswagen, Ford, Volvo, Hyundai et Kia équiperont également leurs véhicules électriques d'un système de recharge bidirectionnelle ou ont du moins annoncé qu'ils s'y mettaient. Il convient néanmoins de relever que beaucoup de constructeurs proposent seulement des fonctionnalités limitées, en particulier le « vehicle-to-load » et parfois le « vehicle-to-home ». Volkswagen, par exemple, limite le nombre de cycles de charge et la quantité d'énergie réinjectée. Pour compliquer les choses, les dispositifs proposés sont généralement des solutions propriétaires qui ne fonctionnent qu'avec certaines bornes de recharge et certains systèmes de gestion de l'énergie. Ils n'offrent ainsi pas une de fonctionnalité bidirectionnelle complète au sens du « vehicle-to-grid ».

Les bornes de recharge bidirectionnelle commercialisées actuellement sont relativement chères et fonctionnent avec du courant continu. Certains constructeurs s'efforcent néanmoins de proposer une fonctionnalité bidirectionnelle en courant alternatif embarquée dans le véhicule électrique, ce qui permet de connecter directement le véhicule au réseau sans passer par une borne de recharge. Il semble que des normes de recharge différentes s'imposeront dans les trois principaux marchés que sont l'Asie, l'Europe et les États-Unis. Des technologies et des normes de recharge différentes freinent la pénétration des véhicules à recharge bidirectionnelle sur le marché. Malgré la multiplication des annonces des constructeurs et les efforts législatifs déployés au niveau international pour renforcer le soutien au « vehicle-to-grid » ces derniers temps, il faudra encore quelques années avant que les véhicules électriques à recharge bidirectionnelle ne représentent une part significative du parc automobile.

5.3 Rémunération pour l'utilisation du réseau

Les cas particuliers de rémunération pour l'utilisation du réseau sont désormais réglés dans la loi fédérale relative à un approvisionnement en électricité sûr reposant sur des énergies renouvelables. Le principe qui prévaut est que toutes les technologies de stockage sont traitées de la même façon. Les véhicules électriques sont considérés comme des installations de stockage avec consommation finale. Dans ce cas, la rémunération pour l'utilisation du réseau est remboursée sur demande conformément à l'art. 14a, al. 4, let. a, de la loi sur l'approvisionnement en électricité (LApEI ; RS 734.7). Cette disposition atteint sur le fond l'objectif que le « vehicle-to-grid » ne subisse pas de désavantage économique par rapport aux autres technologies de stockage. Le remboursement est effectué à la demande du gestionnaire de l'installation de stockage, qui doit à cette fin apporter la preuve des flux électriques concernés, soit du soutirage sur le réseau et de l'injection dans le réseau ainsi que de la recharge et de la décharge de la batterie. Le changement législatif a levé un important obstacle au niveau de la réglementation. Si le véhicule électrique est essentiellement utilisé pour stocker de l'énergie, le remboursement intégral de la rémunération pour l'utilisation du réseau ne garantit pas que l'utilisation soit au service du réseau,

étant donné qu'il n'est plus possible de créer des incitations avec des tarifs de réseau dynamiques ou variables en fonction des heures. En ce qui concerne les tarifs de réseau de ce genre, il serait néanmoins possible de définir une rémunération constante pour l'utilisation du réseau qui corresponde à la période tarifaire où le prix est le plus bas. Il resterait ainsi une incitation à obtenir une utilisation au service du réseau et les critères de l'art. 14a LApEI seraient remplis.

Comme un véhicule électrique peut être rechargé et déchargé en tant qu'installation de stockage mobile à différents points de raccordement au réseau, la mise en œuvre pose certains défis relatifs à la preuve à apporter des quantités d'énergie pertinentes pour le remboursement de la rémunération pour l'utilisation du réseau, notamment lorsque les points de raccordement au réseau concernés sont situés dans la zone de desserte de différents gestionnaires de réseau de distribution. Un décompte correct requiert en principe la centralisation du relevé des processus de recharge et de décharge. Une comptabilisation centralisée de ce genre représente un travail administratif considérable générant aussi des coûts liés à la mesure de l'électricité ainsi qu'à la transmission et au traitement des données.²²

5.4 Attestations d'origine

Dans le système actuel, les attestations d'origine sont supprimées après que le fournisseur a fourni l'électricité au consommateur. Avec la nouvelle définition de la consommation finale qui comprend désormais aussi le stockage (art. 4, al. 1, let. b, LApEI), l'énergie soutirée par une installation de stockage est soumise à l'obligation de déclarer pour le marquage de l'électricité. Les attestations d'origine sont disponibles pour la quantité d'énergie non utilisée pour la consommation finale après le soutirage effectué sur le réseau. Un monitoring transparent et une documentation complète sont nécessaires pour la traçabilité des attestations d'origine, en particulier pour une installation de stockage mobile qui peut être rechargée à différents points de raccordement au réseau. La mise en œuvre de la traçabilité des attestations d'origine pose ainsi des défis similaires à ceux rencontrés pour apporter la preuve des flux énergétiques afin d'obtenir le remboursement de la rémunération pour l'utilisation du réseau.

Il faudrait viser un système de décompte aussi simple que possible pour les attestations d'origine, étant donné que la rentabilité de la recharge bidirectionnelle dépend principalement de la structure tarifaire et, dans une moindre mesure, des recettes générées par les attestations d'origine. L'utilisation d'attestations d'origine dans la mobilité électrique n'est pas réglée à ce jour. On peut se poser la question de la pertinence de légiférer en détail si l'on considère le rapport coûts-utilité.

5.5 Tarifs dynamiques et rémunération de la flexibilité

Mettre à disposition un véhicule électrique au service du réseau et du système au moyen de la recharge bidirectionnelle ne va pas de soi : des incitations financières sont nécessaires pour encourager cette démarche. Il y a lieu de distinguer entre différentes possibilités d'incitations.

Des tarifs dynamiques d'utilisation du réseau et la rémunération de l'accès à la flexibilité sont susceptibles d'encourager l'utilisation de la flexibilité au service du réseau. L'art. 17c LApEI prévoit que les gestionnaires d'installations de stockage sont les détenteurs de la flexibilité, qui peut être mise au service du réseau par les gestionnaires de réseau de distribution dans leur zone de desserte. L'utilisation de la flexibilité et, le cas échéant, la rémunération sont définies dans un contrat non discriminatoire. Il est aussi possible de prévoir la rémunération dans sa structure tarifaire. S'agissant de la garantie de l'utilisation de la flexibilité au service du réseau (art. 17c, al. 4, LApEI), l'ajustement de l'injection est explicitement mentionné, mais on peut aussi envisager la réduction du courant de charge (dans le cadre du « smart charging ») ou l'arrêt total d'une borne de recharge en cas de mise en péril de la sécurité d'exploitation du réseau. Dans ce contexte, il conviendrait de préciser dans quelle mesure il est possible de recourir à la flexibilité offerte par l'injection d'électricité provenant de la batterie du véhicule au moyen de la recharge bidirectionnelle. Il s'agira d'examiner si la réglementation Sunshine introduite par la loi fédérale

²² Office fédéral de l'énergie (OFEN) : Erfassung und Transfer von Netznutzungsdaten für Speicher mit Endverbrauch (saisie et transfert des données d'utilisation du réseau concernant les installations de stockage avec consommation finale, en allemand avec un résumé en français). Berne, 12 juillet 2024.

relative à un approvisionnement en électricité sûr reposant sur des énergies renouvelables (art. 22a LA-peI) peut créer les incitations nécessaires du côté des gestionnaires de réseau pour favoriser la demande de flexibilité.

Outre l'utilisation directe de la flexibilité par les gestionnaires de réseau de distribution, il est aussi possible d'encourager l'utilisation au service du réseau par des tarifs d'utilisation du réseau dynamiques ou variables en fonction des heures. Un tarif de ce genre doit en principe refléter la courbe de charge du réseau comme le faisaient à l'origine le tarif haut et le tarif bas traditionnels. Il est possible de mieux refléter l'état de charge du réseau en augmentant la fréquence d'actualisation (p. ex. toutes les 15 minutes) et en fixant les tarifs très peu à l'avance. Une telle tarification dynamique permettrait d'automatiser, au moyen de seuils définis, le soutirage p. ex. par une borne de recharge intelligente. Cette automatisation doit néanmoins absolument éviter que la réaction ou le réglage simultané de nombreux consommateurs génèrent de nouveaux pics de charge.

Une différenciation régionale des tarifs serait souhaitable pour tenir compte de la situation locale du réseau de distribution. La rémunération de l'injection au service du réseau provenant de la recharge bidirectionnelle et du photovoltaïque devrait aussi refléter de manière dynamique l'état de charge actuel du réseau. La tarification devrait tenir compte de la production actualisée, de façon dynamique et conforme au marché, en vue d'une meilleure intégration des énergies renouvelables. Le stockage intermédiaire d'électricité solaire pourra ainsi devenir rentable grâce à l'arbitrage.

5.6 Remarques générales au sujet de la conception du marché de l'électricité

Faute d'incitations favorisant une exploitation rentable du réseau, la réglementation en vigueur, basée sur les coûts (contrairement à la réglementation basée sur des incitations dans certains États membres de l'UE), risque de restreindre considérablement l'utilisation de la flexibilité au service du réseau. Il faut aussi partir de l'idée que le monopole existant actuellement dans l'approvisionnement de base entrave également le développement de modèles d'affaires innovants qui répondent aux besoins de la clientèle. Dans le cadre légal actuel, les dispositions relatives à la séparation entre les activités relevant du réseau et les activités de distribution d'énergie constituent un défi. Le renforcement de la séparation des secteurs d'activités du côté des gestionnaires de réseau et une plus grande ouverture du marché induiraient aussi une plus grande diversité des tarifs énergétiques pour les ménages et les PME par rapport à ce qu'ils ont à leur disposition actuellement au niveau de l'approvisionnement de base (marqué par des prix plutôt statiques).

Par ailleurs, la mise en œuvre de la loi fédérale relative à un approvisionnement en électricité sûr reposant sur des énergies renouvelables devra tenir compte du fait que la réduction de la rémunération pour l'utilisation du réseau par exemple en cas de tarifs dynamiques ou variables en fonction des heures ou en cas d'indemnisation pour le pilotage par le gestionnaire du réseau de distribution doit par conséquent être proportionnée aux coûts de réseau économisés. Il serait, en outre, souhaitable que les rétributions de reprise de l'électricité prévues par la loi (rétribution basée sur l'obligation de reprise et de rétribution fixée à l'art. 15 de la loi sur l'énergie ; LEne, RS 730.0) tiennent compte des situations de pénurie sur le marché et sur le réseau, ce qui créerait des incitations pour une utilisation au service du réseau ou du système.

5.7 Technique de mesure et communication

Concernant le « vehicle-to-home » et le « vehicle-to-building », tous les systèmes interagissant, à savoir les véhicules électriques, les bornes de recharge et les bâtiments, sont en mains privées. Le pilotage et la communication peuvent s'effectuer conformément aux protocoles établis (Open Charge Point Protocol [OCPP] et norme ISO 15118). S'agissant du « vehicle-to-grid », un pilotage de l'installation de stockage qui soit au service du réseau ou du système nécessite d'accorder l'accès à des instances externes, p. ex. les gestionnaires du réseau de distribution ou des agrégateurs. Le remboursement des rémunérations pour l'utilisation du réseau ainsi que la traçabilité des attestations d'origine requièrent une documentation complète des flux d'électricité, à savoir des processus de recharge et de décharge ainsi que des injections dans le réseau et des prélèvements sur le réseau. Ce relevé exige la mesure exacte des flux d'électricité, d'une part, et leur comptabilisation pour chaque installation de stockage, d'autre

part. Cette comptabilité doit être effectuée par une instance externe indépendante, idéalement par une plateforme centralisant les données. Comme le « vehicle-to-grid » offre en général de petites quantités d'électricité et de kilowattheures, il est nécessaire de proposer une solution rentable, consommant peu de ressources et englobant la mesure, la transmission et le traitement des données requises. Dans le cas d'une installation de stockage mobile, la situation juridique en matière de protection des données doit aussi être clarifiée, étant donné que les points d'injection et les points de soutirage doivent être enregistrés.

La borne de recharge constitue l'interface clé pour le raccordement du véhicule électrique au réseau. Elle est capable de communiquer à la fois avec le véhicule électrique et le réseau d'électricité. La norme ISO 15118 aujourd'hui mise en œuvre dans différentes versions est un standard international uniforme largement répandu. Comme il s'agit d'un standard relativement ouvert, il n'exclut pas les solutions propriétaires. Il n'y a pas d'interopérabilité complète entre les différents véhicules électriques, bornes de recharge, systèmes de gestion de l'énergie et réseaux. L'interopérabilité insuffisante désécurise les acteurs sur le marché et entrave l'essor du « vehicle-to-grid ».

5.8 Gestion des groupes-bilan

Chaque point de mesure doit être attribué à un groupe-bilan. Si un point de mesure correspond aussi à une production (photovoltaïque) et une installation de stockage, il peut arriver que l'électricité soit reprise par plusieurs repreneurs attribués à différents groupes-bilan. Vu que dans le système actuel une seule partie est responsable de l'énergie d'ajustement, il faut trouver de nouvelles solutions pour la gestion des groupes-bilan.

6 Conclusion

La recharge bidirectionnelle et le « smart charging » (recharge intelligente) peuvent servir à soutenir le système énergétique en tant qu'éléments de flexibilité. Le « smart charging » vise à écrêter les pics de charge en décalant la recharge aux heures de faible sollicitation du réseau. La recharge bidirectionnelle peut être utilisée par les ménages et les communautés d'énergie pour augmenter l'autoconsommation (aussi appelée « consommation propre ») de la production photovoltaïque et écrêter les pics de charge. Ces deux technologies déchargent les réseaux en amont et le système énergétique dans son ensemble.

La réinjection, dans le réseau d'électricité, de l'énergie stockée dans les batteries des véhicules électriques peut améliorer la stabilité du réseau, ce qui réduit la nécessité d'effectuer des investissements coûteux dans des infrastructures supplémentaires ou de mettre en place des réserves de capacité additionnelles pour gérer les charges de pointe. La recharge bidirectionnelle soutient l'intégration des énergies renouvelables telles que l'éolien ou le solaire en stockant temporairement l'énergie excédentaire et en la réinjectant dans le réseau en cas de besoin. La production d'électricité peut être plus efficace et la dépendance aux importations réduite quand les ménages et les entreprises sont capables de mieux exploiter leurs propres sources d'énergie et de réinjecter l'énergie excédentaire dans le réseau. La recharge bidirectionnelle peut contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre en encourageant l'utilisation des énergies renouvelables et en optimisant la consommation électrique.

La mobilité électrique pourrait jouer un rôle décisif dans le futur système énergétique en servant à mieux intégrer la production photovoltaïque. La recharge aux heures de midi permet d'absorber une plus grande partie de la production photovoltaïque maximale et donc d'éviter ou du moins de réduire l'ajustement. Une partie de l'énergie temporairement stockée dans le véhicule électrique peut être réinjectée le soir et la nuit dans le réseau. Il convient de relever la convergence du photovoltaïque et de la mobilité électrique : la part de ces deux technologies croît à un rythme similaire et elles sont souvent utilisées à proximité l'une de l'autre. Une planification prévisionnelle et rigoureuse des gestionnaires de réseau permet d'éviter les extensions du réseau qui ne sont pas nécessaires. Cette utilisation de la recharge bidirectionnelle importante pour le système global requiert cependant de la concurrence et l'accès au marché de l'énergie, p. ex. par l'intermédiaire d'agrégateurs, ainsi que des tarifs dynamiques pour le

réseau et pour l'énergie. Réduire l'ajustement et ainsi mieux intégrer le photovoltaïque ou d'autres énergies renouvelables permettent de diminuer la dépendance à l'étranger et d'optimiser les coûts du système.

La flexibilité générée par « smart charging » et par la recharge bidirectionnelle peut contribuer à décharger les réseaux de distribution. Hormis les tarifs dynamiques ou variables en fonction des heures et les rémunérations pour le pilotage par le gestionnaire de réseau de distribution, il manque aussi de nouveaux modèles d'affaires pour la rémunération de la mise à disposition de la flexibilité. Seul l'accès au marché de la puissance de réglage par l'intermédiaire des agrégateurs est prévu par la loi aujourd'hui. Indépendamment de l'utilisation et des modèles d'affaires, la rentabilité de la recharge bidirectionnelle dépend principalement des coûts des infrastructures de recharge. Il faut que les revenus générés par la recharge bidirectionnelle soient nettement supérieurs aux coûts d'investissement sur la durée de vie du véhicule électrique. Compte tenu des prix actuellement élevés des bornes de recharge bidirectionnelles, cela n'est possible qu'avec des modèles d'affaires spécifiques. Une plus grande diffusion de la recharge bidirectionnelle et une plus grande offre de véhicules électriques supportant la recharge bidirectionnelle permettent toutefois d'escompter une forte chute des prix des bornes de recharge bidirectionnelle.

La loi fédérale relative à un approvisionnement en électricité sûr reposant sur des énergies renouvelables a mis sur un pied d'égalité différentes technologies de stockage en ce qui concerne la rémunération pour l'utilisation du réseau. Elle a levé un important obstacle. Du point de vue du législateur, il faut assurer un accès équitable et non discriminatoire aux marchés de l'énergie, du réglage et de la flexibilité pour permettre la rentabilité de la recharge bidirectionnelle. L'interaction de divers acteurs ayant des intérêts différents reste un enjeu à la fois sur le plan technique et sur le plan législatif. Le pilotage, la communication, la mesure de l'électricité et le décompte posent notamment des défis tant techniques que réglementaires, qui ne doivent pas être sous-estimés.