



Commission économique pour l'Europe**Comité des transports intérieurs****Groupe de travail chargé d'examiner les tendances et l'économie des transports****Trente-sixième session**

Genève, 4-6 septembre 2023

Point 8 a) de l'ordre du jour provisoire

Évaluation et suivi des questions nouvelles et des objectifs de développement durable : Tendances et difficultés concernant les transports routiers, les transports ferroviaires et les transports par voie navigable**Tendances générales et évolutions concernant les véhicules électriques et leurs infrastructures de recharge – interdépendances entre la mobilité électrique et le système énergétique*****Note du secrétariat****I. Introduction**

1. Le Groupe de travail chargé d'examiner les tendances et l'économie des transports (WP.5) ayant demandé à sa précédente session que la publication « Transport Trends and Economics 2022-2023 » (Tendances et économie des transports pour la période 2022-2023) soit consacrée aux tendances générales et aux évolutions concernant les véhicules électriques et leurs infrastructures de recharge, le secrétariat a établi, avec le concours d'un consultant externe, un projet de publication figurant dans les documents ECE/TRANS/WP.5/2023/4, ECE/TRANS/WP.5/2023/5, ECE/TRANS/WP.5/2023/6, ECE/TRANS/WP.5/2023/7 et ECE/TRANS/WP.5/2023/8, qui sera soumis pour observations¹.

2. Le présent document traite des interdépendances entre la mobilité électrique et le système énergétique au sens large. Les auteurs y examinent les moyens d'intégrer de manière plus harmonieuse les infrastructures de recharge des véhicules électriques dans le système

* Il a été convenu que le présent document serait publié après la date normale de publication en raison de circonstances indépendantes de la volonté du soumetteur.

¹ Le personnel de la Division des transports durables et de la Division de l'énergie durable de la Commission économique pour l'Europe (CEE) a été consulté au cours du processus d'élaboration des documents n^{os} 4 à 8. Au sein de la Division des transports durables de la CEE, le personnel des sections Facilitation et économie des transports, Règlements concernant les véhicules, Sécurité routière et innovations dans le domaine des transports et Transport intermodal et logistique a contribué aux travaux et restera, avec la Division de l'énergie durable de la CEE, étroitement associé à la poursuite de l'élaboration de cette publication.



énergétique, notamment en utilisant les technologies dites V2G (Vehicle-To-Grid, « du véhicule vers le réseau électrique »), qui permettent de moins dépendre des centrales électriques traditionnelles, favorisent l'adoption généralisée des énergies renouvelables et ouvrent la voie à la mise en place de systèmes de transport et d'énergie plus durables. À partir de la section IV (par. 51 à 60), on trouvera des conclusions générales préliminaires qui valent pour l'ensemble de la publication, notamment concernant les aspects traités dans les documents de travail 4, 5, 6 et 7 mentionnés ci-dessus. Par souci de commodité, la partie consacrée à ces conclusions préliminaires a été soumise dans les trois langues de travail de la CEE en tant que document informel n° 4.

3. Les membres du WP.5 sont invités à faire part de leurs observations et de leurs propositions d'amélioration du texte et à présenter des études de cas nationales et des exemples de bonnes pratiques à intégrer dans la version définitive de la publication.

II. Mobilité électrique et système énergétique

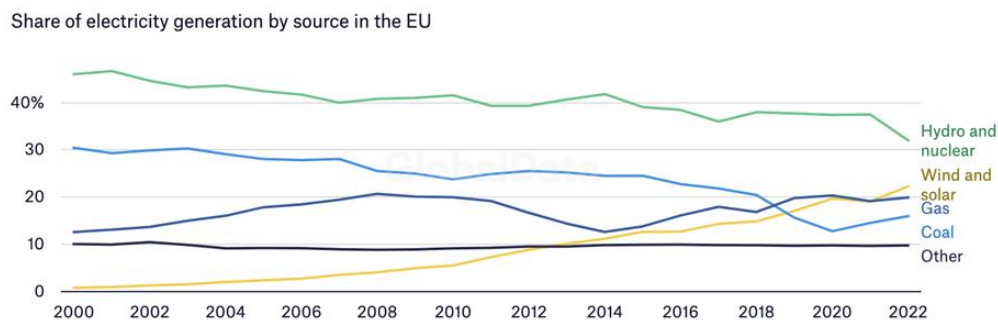
A. Véhicules électriques à émission zéro

4. Les véhicules électriques présentent un avantage considérable en matière d'émissions de gaz à effet de serre (GES), même lorsqu'ils sont alimentés par un réseau électrique ordinaire. Toutefois, pour être considérés comme des véhicules à faible intensité de carbone, ils doivent s'appuyer sur un apport important d'énergie renouvelable ou sur le captage et le stockage du dioxyde de carbone (CSC). Pour accroître les avantages des véhicules électriques en matière d'émissions de GES, il faut donc non seulement développer les écosystèmes et les marchés des véhicules électriques, mais aussi transformer de manière globale le système énergétique, en accordant une attention particulière à l'augmentation de la part de l'électricité renouvelable dans le bouquet énergétique.

5. Ces dernières années, les pays de l'Union européenne et d'autres régions ont enregistré une tendance notable à l'augmentation de la part des énergies renouvelables, principalement grâce à l'adoption de politiques et de stratégies visant à assurer la transition vers un système énergétique durable et à faible intensité de carbone. L'Union européenne s'est fixé des objectifs ambitieux en matière d'énergies renouvelables, notamment celui de faire en sorte qu'au moins 32 % de sa consommation finale repose sur ces énergies d'ici à 2030. Cela a donné lieu à une augmentation des investissements dans les technologies correspondantes telles que l'éolien, le solaire et l'utilisation de la biomasse, ainsi qu'à la mise en œuvre de stratégies d'incitation, passant notamment par les tarifs de distribution, les ventes aux enchères et les certificats d'énergie renouvelable, qui ont favorisé le déploiement des énergies renouvelables. En outre, d'autres pays et régions du monde ont également adopté des politiques et des stratégies semblables en matière d'énergies renouvelables, contribuant ainsi à la croissance mondiale des capacités dans le domaine et à la transition vers des systèmes énergétiques plus propres et plus durables².

² https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-targets_en.

Figure I
Part de la production d'électricité par source dans l'Union européenne

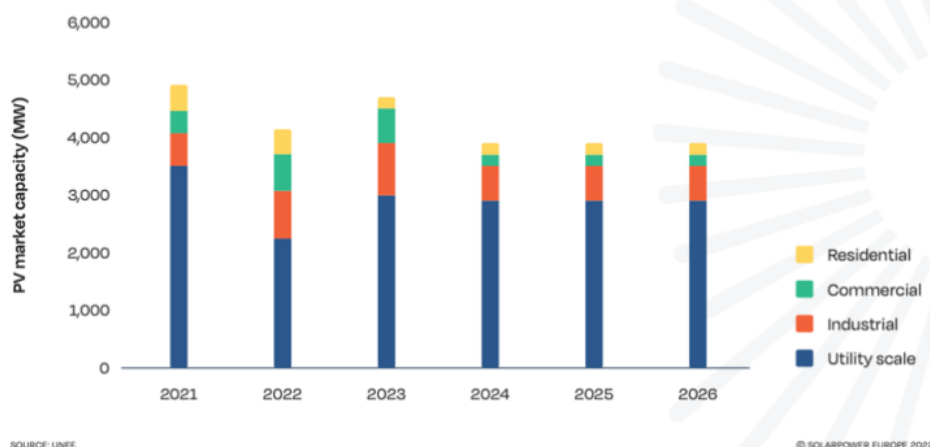


Source : Energy Monitor³. Consulté le 8 juin 2023.

6. En raison d'une production intermittente, l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux pose des problèmes de fiabilité. L'adaptation de la production variable d'énergie renouvelable à la demande des consommateurs en temps réel nécessite l'adoption de méthodes avancées de prévision, de mesures favorisant la flexibilité du réseau, telles que le stockage de l'énergie, et de technologies à l'appui d'un réseau électrique intelligent. Des infrastructures de transport fiables et des mécanismes permettant d'assurer la continuité de l'approvisionnement sont également nécessaires. Il faudra relever ces défis pour garantir une intégration fiable et un système énergétique durable. Chaque région a adopté sa propre stratégie d'intégration des diverses technologies de production d'énergie renouvelable en fonction de ses caractéristiques géographiques. Les pays dans lesquels la densité de population est élevée, comme les Pays-Bas, adoptent le solaire résidentiel car ils manquent d'espace pour créer des parcs solaires plus importants, tandis que d'autres pays, comme l'Espagne, mettent en place des parcs solaires à l'échelle des services d'utilité publique. Ces deux tendances en matière de production d'électricité présentent certains risques du point de vue de la fiabilité du réseau et nécessitent donc d'adopter des solutions et des techniques adaptées à leurs effets.

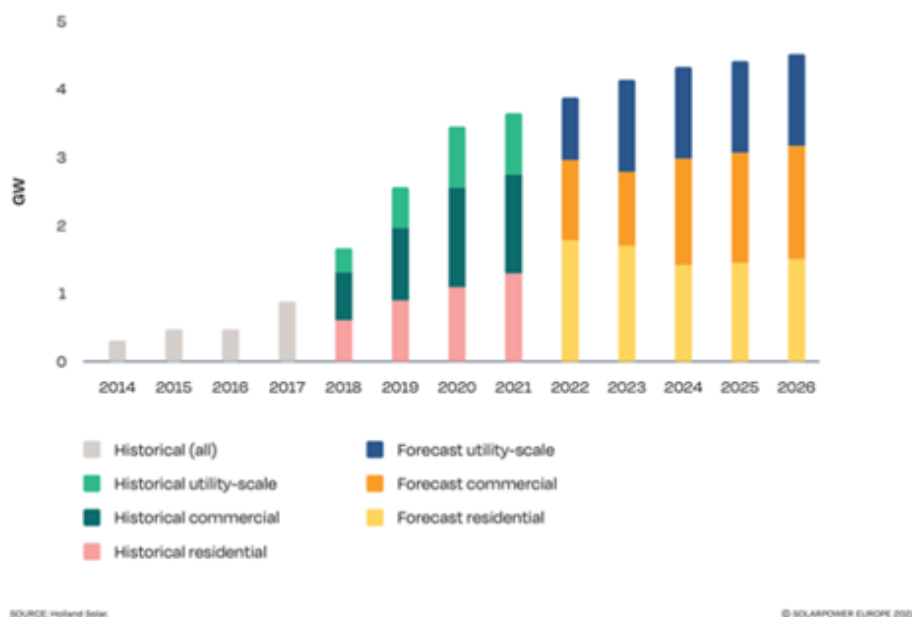
Figure II
Marchés de l'énergie solaire photovoltaïque en Espagne et aux Pays-Bas

FIGURE GW 2 SPAIN SOLAR PV MARKET 2021-2026, BY UNEF



³ www.energymonitor.ai/tech/renewables/europe-renewables-in-2022-in-five-charts-and-what-to-expect-in-2023/.

FIGURE GW 4 NETHERLANDS SOLAR PV MARKET SCENARIOS 2022-2026, BY HOLLAND SOLAR



Source : Solar Power Europe (2022).

B. Intégration des sources d'énergie renouvelables

7. La quantité d'énergie renouvelable produite par chaque source est imprévisible et varie chaque jour et à chaque heure en fonction de facteurs tels que les conditions météorologiques et la vitesse du vent. Ces variations posent des problèmes de stabilité du réseau et il faut donc avoir recours à des solutions innovantes pour gérer efficacement les fluctuations quotidiennes et horaires de la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables. Les méthodes avancées de prévision jouent un rôle de premier plan à cet égard. En s'appuyant sur les données météorologiques, les tendances historiques et des techniques de modélisation sophistiquées, les gestionnaires de réseaux et les acteurs du marché de l'énergie peuvent utiliser des prévisions précises pour anticiper les variations des niveaux de production d'énergie renouvelable. Ces informations permettent d'améliorer la planification et la gestion des réseaux, de mieux répartir l'approvisionnement en électricité et d'équilibrer l'offre et la demande. Les systèmes de prévision en temps réel fournissent des informations utiles sur les variations à court terme, ce qui permet aux gestionnaires de procéder à des ajustements rapides et d'assurer la stabilité du réseau.

8. Les techniques de stockage de l'énergie jouent également un rôle essentiel dans la gestion des fluctuations quotidiennes et horaires de la production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables. Les systèmes de stockage de l'énergie, tels que les batteries et les systèmes d'accumulation par pompage hydraulique, permettent de prélever et de stocker l'électricité excédentaire pendant les périodes de forte production d'énergie renouvelable. L'énergie stockée peut ensuite être distribuée pendant les périodes de faible production d'électricité produite à partir de sources renouvelables, ce qui permet de combler l'écart entre l'offre et la demande et de garantir un approvisionnement plus stable. Le stockage de l'énergie offre aux gestionnaires de réseaux la flexibilité nécessaire pour s'adapter au caractère intermittent de la production d'énergie renouvelable et garantir la fiabilité du système énergétique. En outre, les programmes de réponse à la demande jouent un rôle important dans la gestion des fluctuations de la production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables. Ces programmes incitent les consommateurs à adapter leur consommation d'électricité en fonction de la disponibilité des énergies renouvelables.

En encourageant les utilisateurs à consommer durant les périodes de forte production d'électricité à partir d'énergies renouvelables ou à réduire leur consommation pendant les périodes de faible production, ils contribuent à mieux équilibrer le système énergétique et à en améliorer l'efficacité.

9. Traditionnellement, les centrales électriques dotées d'importantes réserves tournantes sont garantes de la stabilité du réseau énergétique. La réserve tournante désigne la capacité de certaines centrales électriques à rester synchronisées avec le réseau et prêtes à fournir immédiatement de l'électricité en cas de variations inattendues de la demande ou de fluctuations de la production. Elle sert de dispositif de régulation permettant de garantir la stabilité du réseau et d'assurer un approvisionnement en électricité fiable en ajustant rapidement la production de manière à répondre à la demande. Les réserves tournantes permettent de faire face aux fluctuations des sources d'énergie renouvelables et contribuent à la stabilité et à la résilience du système électrique. Ces réserves, qui reposent sur des turbines fonctionnant en permanence, font qu'il est possible de réagir immédiatement pour équilibrer la dynamique de l'offre et de la demande et maintenir un niveau de fréquence normalisé. Cependant, le recours aux sources d'énergie renouvelables, qui ne permettent généralement pas de disposer d'importantes réserves tournantes, pose un problème pour la régulation du réseau. Sans les réserves tournantes, des écarts par rapport au niveau de fréquence normalisé peuvent se produire en raison de déséquilibres entre l'offre et la demande d'électricité. Ces écarts de fréquence, qu'il s'agisse d'une hausse ou d'une baisse du niveau, peuvent perturber le bon fonctionnement des appareils et des équipements électriques connectés au réseau. Les réserves tournantes permettent de répondre rapidement aux fluctuations soudaines, tandis que l'équilibrage de la charge permet de gérer la production d'électricité de manière à garantir la stabilité et la fiabilité du réseau.

10. L'intégration des véhicules électriques dans le système énergétique lui-même entraîne également ce type de difficultés car le rythme des recharges effectuées est imprévisible et la demande liée à ces recharges est relativement forte en comparaison avec la consommation d'électricité résidentielle habituelle. Les habitudes de recharge des propriétaires de véhicule électrique peuvent varier considérablement en fonction des préférences personnelles, des activités quotidiennes et de la disponibilité des infrastructures de recharge. Cette imprévisibilité introduit un degré d'incertitude dans le système énergétique, car le réseau doit pouvoir faire face à des hausses soudaines de la demande lorsqu'un grand nombre de véhicules électriques sont branchés simultanément pour être rechargés.

11. Les besoins de recharge des véhicules électriques peuvent être supérieurs à la consommation d'électricité habituelle des ménages. Alors que la consommation d'électricité résidentielle est principalement liée à l'éclairage et aux appareils électroménagers et électroniques, la recharge des véhicules électriques nécessite une quantité d'électricité beaucoup plus importante. Cette demande accrue peut exercer une pression sur le système énergétique, en particulier pendant les heures pleines, lorsque la consommation d'électricité est déjà la plus élevée. Faute de stratégies de gestion appropriées et de mise à niveau des infrastructures, la recharge simultanée de nombreux véhicules électriques peut entraîner une saturation du réseau, faire varier la tension et compromettre la stabilité du système.

12. La mise en application de technologies de recharge intelligente et de couplage du véhicule vers le réseau électrique (V2G) a un rôle crucial à jouer pour relever ces défis. La recharge intelligente désigne une méthode judicieuse de recharge des véhicules électriques qui optimise le processus en fonction de la situation du réseau, des prix de l'électricité et des préférences de l'utilisateur. Elle permet d'éviter les périodes de forte demande, d'équilibrer au mieux les charges et de maximiser l'utilisation des énergies renouvelables. La recharge intelligente s'appuie sur des technologies qui permettent de surveiller et de contrôler la situation et d'assurer la coordination en temps réel entre les véhicules électriques, les stations de recharge et le gestionnaire du réseau. En rendant possible les échanges d'énergie entre les véhicules électriques et le réseau, les systèmes V2G permettent d'utiliser les batteries des véhicules électriques non seulement pour consommer de l'énergie, mais aussi comme sources d'énergie. Pendant les périodes de forte demande, les véhicules électriques peuvent réinjecter dans le réseau l'électricité stockée, réduisant ainsi les besoins de production supplémentaire d'électricité selon la méthode habituelle. La technologie V2G permet aux véhicules électriques de prendre une part active dans le

système énergétique en se rechargeant pendant les périodes creuses et en réinjectant de l'électricité dans le réseau pendant les périodes de forte demande. Ce mécanisme permet de réguler les niveaux produits, d'équilibrer l'offre et la demande, et de garantir ainsi la stabilité du réseau.

13. Alors que la technologie V2G porte uniquement sur les interactions entre les véhicules électriques et le réseau, la technologie V2X permet la communication et les échanges d'électricité entre les véhicules électriques et différentes entités, telles que le réseau, les infrastructures, d'autres véhicules et les logements intelligents. La technologie V2G porte uniquement sur les interactions entre les véhicules électriques et le réseau électrique, et permet aux véhicules électriques de réinjecter de l'électricité dans le réseau⁴.

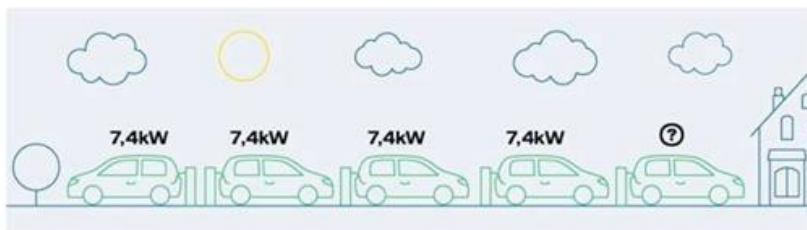
Figure III
Équilibrage dynamique des recharges avec plusieurs stations de recharge

Situation 1: 4 cars at 5 charging stations



The 5 charging stations have a total capacity of 30kW. There is a car at 4 charging stations. Each car is charged with 7.4kW. The 4 charging stations use all available power.

Situation 2: the 5th charging station is also occupied



A 5th car is coming. That car must charge at a minimum of 7.4kW. In total, the power must then be 37kW. But: the power is 30kW.

Situation 3: 1 car on hold every 15 minutes



Every 15 minutes a different car is on hold. So 4 cars are always charging at the same time. As soon as 1 car is full, the other 4 cars can all charge at the same time and breaks are no longer necessary.

Source : Vattenfall⁵. Consulté le 8 juin 2023.

⁴ Selon ce rapport, les batteries des véhicules électriques pourraient répondre aux besoins de stockage des réseaux d'ici à 2030 dans la plupart des régions du monde : <https://www.nature.com/articles/s41467-022-35393-0>.

⁵ <https://incharge.vattenfall.nl/kennis/smart-charging>.

C. Définitions des technologies

14. La recharge intelligente et la technologie V2G permettent d'assurer un flux continu d'énergie, d'informations et de transactions financières entre les propriétaires de véhicule électrique, les agrégateurs et le réseau électrique, l'objectif final étant de parvenir à un équilibre stable entre l'offre et la demande d'énergie. La structure de base des systèmes V2G s'articule autour de trois éléments clefs : les dispositifs de connexion des prises, les systèmes de communication et de contrôle qui permettent d'établir des interactions dynamiques entre le gestionnaire du réseau et les batteries des véhicules électriques selon leur état, ainsi que les dispositifs de mesure qui enregistrent avec précision les flux d'électricité dans les deux sens.

15. Les systèmes V2G s'appuient sur une stratégie de tarification incitative visant à encourager les propriétaires de véhicule électrique à participer activement aux processus de recharge et de décharge. Pendant les périodes de faible demande, caractérisées par une offre importante d'électricité excédentaire sur le réseau, les propriétaires de véhicule électrique peuvent recharger leur véhicule à des tarifs réduits. Inversement, pendant les périodes de forte demande, lorsque le réseau manque d'électricité, les véhicules électriques peuvent réinjecter dans le réseau l'électricité stockée, à des tarifs plus élevés. Ce plan de tarification particulier permet aux propriétaires de véhicule électrique de bénéficier de conditions tarifaires avantageuses grâce à leur participation active au système.

16. Dans le domaine de l'intégration des systèmes de recharge des véhicules électriques, l'efficacité de la communication entre le gestionnaire du réseau, le marché de l'électricité et les utilisateurs de véhicules électriques est extrêmement importante. Grâce à la mise sur le marché de technologies de pointe, telles que les applications sur les smartphones, la communication a pris une nouvelle dimension en permettant des interactions et une coordination en temps réel. Des applications spécialisées pour smartphones permettent aux utilisateurs de véhicules électriques de recevoir des informations sur l'état du réseau, l'évolution de la tarification et les prévisions en matière de demande. Ils peuvent ainsi prendre des décisions éclairées concernant leurs préférences en matière de recharge et leurs horaires de recharge. Par exemple, les utilisateurs peuvent consulter des données sur les prix de l'électricité à différents moments, ce qui leur permet d'organiser au mieux leurs habitudes de recharge de manière à bénéficier des tarifs les plus bas pendant les heures creuses. Ils peuvent également recevoir des notifications ou des alertes du gestionnaire de réseau concernant les limitations du réseau ou des événements qui pourraient les obliger à recharger différemment. En outre, les marchés de l'électricité peuvent tirer parti des applications des smartphones pour faciliter le recours aux programmes de réponse à la demande. Ces programmes incitent les utilisateurs de véhicules électriques à adapter leur recharge en fonction des indications fournies par le marché. Par exemple, pendant les périodes de forte demande d'électricité, le marché peut envoyer des indications de prix aux utilisateurs de véhicules électriques afin de les encourager à retarder ou à réduire leur recharge. En réaction, les utilisateurs de véhicules électriques peuvent modifier leurs horaires de recharge pour les adapter aux besoins du réseau et bénéficier éventuellement de prix de l'électricité plus bas. Ces interactions dynamiques entre le marché de l'électricité et les utilisateurs de véhicules électriques favorisent une gestion plus efficace des ressources énergétiques disponibles et améliorent la résilience du réseau.

17. Les avantages économiques qui découlent de ces technologies sont indéniables. Dans le schéma réglementaire classique, de puissants générateurs sont mis en service pour répondre à la hausse de la demande en cas d'urgence ou de pénurie d'électricité, ce qui entraîne des frais d'exploitation et de maintenance extrêmement élevés. Les systèmes V2G permettent aux véhicules électriques de stocker l'énergie excédentaire pendant les périodes creuses et de la réinjecter dans le réseau pendant les périodes de forte demande. Ce système innovant réduit ainsi considérablement la dépendance à l'égard des centrales électriques pendant les périodes de forte consommation d'énergie. En outre, l'intégration des sources d'énergie renouvelables et de la recharge des véhicules électriques nécessite des investissements dans les réseaux de transport et de distribution. La mise en place de systèmes de recharge intelligente et de systèmes V2G permet de réduire les investissements nécessaires pour renforcer le réseau et développer les systèmes classiques de stockage de

l'électricité au moyen de batteries. Les modèles de tarification constituent des mécanismes très efficaces d'incitation pour les propriétaires de véhicule électrique car ils permettent de recharger le véhicule à des tarifs plus abordables pendant les heures creuses et de vendre ensuite les excédents d'électricité stockée à des tarifs plus élevés pendant les heures pleines, ce qui génère des bénéfices. Ces modèles de tarification associent le propriétaire du véhicule électrique à la transformation en tant que consommateur proactif (prosommateur) au sein du système énergétique, contrairement aux régimes fiscaux qui font peser sur les citoyens la charge croissante des investissements dans les infrastructures électriques.

Encadré 1

Flexpower Amsterdam

Le projet Flexpower Amsterdam visait à évaluer la faisabilité d'un procédé permettant d'adapter la vitesse de recharge des véhicules électriques en fonction de la disponibilité de l'électricité dans le réseau. Pour ce faire, 100 stations de recharge ont été équipées d'un logiciel spécial permettant de moduler les vitesses de recharge tout au long de la journée. La recharge était plus rapide pendant les périodes creuses et un peu plus lente pendant les heures de forte demande.

Les résultats ont montré que cette recharge dite flexible ou intelligente permettait de recharger plus rapidement les véhicules électriques sans déranger les utilisateurs. L'utilisation du procédé de recharge flexible a également permis de répartir les coûts de recharge sur un plus grand nombre de kilowattheures, d'améliorer le taux d'occupation des stations de recharge, d'utiliser le réseau électrique de manière plus efficace sans devoir en augmenter les capacités, et d'accroître l'utilisation de l'électricité produite à partir d'énergie solaire grâce à une recharge plus rapide pendant la journée.

Source : Elaadnl⁶. Consulté le 16 juin 2023.

Encadré 2

Augmentation de la consommation d'énergie renouvelable grâce aux véhicules électriques

Un projet pilote réalisé à l'hôtel de ville de Leicester visait à intégrer la recharge des véhicules électriques dans la production d'énergie renouvelable sur site afin de réduire l'empreinte carbone et de promouvoir les modes de transport durables. L'analyse de quatre véhicules électriques et de leur profil de recharge a montré que cela permettait effectivement de réduire les émissions de CO₂. L'objectif du « kilomètre parcouru sans aucune émission » n'a pas été atteint car l'électricité produite à partir de l'énergie photovoltaïque a été consommée pour répondre aux besoins énergétiques du bâtiment. Le modèle de place de stationnement virtuelle a montré qu'il était possible d'atteindre une autonomie énergétique de 41 % pour le site étudié. Dans l'ensemble, l'étude a mis en évidence les avantages de la recharge intelligente et le potentiel offert par ce procédé pour intégrer les véhicules électriques dans les systèmes de production d'énergie renouvelable, ce qui contribue à la mise en place de systèmes de transport durables et respectueux de l'environnement.

Source : Université des sciences appliquées d'Amsterdam (2020).

Encadré 3

Technologie révolutionnaire de recharge éclair pour les transports publics de la ville de Genève

En mai 2013, la ville de Genève a lancé le projet pilote TOSA (Trolleybus Optimisation Système Alimentation), tirant parti d'une technologie révolutionnaire de recharge éclair. Le trolleybus TOSA a été conçu pour desservir l'ensemble des lignes d'autobus de la ville. Il est équipé de batteries légères embarquées qui reçoivent des charges

⁶ <https://elaad.nl/en/projects/flexpower-amsterdam/>.

de 600 kilowatts en quinze à vingt secondes au moyen d'un bras robotisé guidé par laser lors des arrêts habituels du véhicule pour l'entrée et la sortie des passagers. Cette technologie révolutionnaire, mise au point par le groupe ABB, chef de file mondial des technologies dans ce secteur, garantit le fonctionnement continu du trolleybus d'une station de recharge à l'autre. Le succès du projet pilote a conduit à la mise en service complète de la ligne de trolleybus 23 de Genève à partir de 2018. Cette ligne se caractérise par les spécifications suivantes : a) parc de 12 bus articulés (18 m) ; b) stations de recharge rapide situées à 13 des 50 arrêts de la ligne, qui fournissent des charges de 600 kilowatts en quinze à vingt secondes ; c) stations de recharge aux terminus, fournissant des charges prolongées de 400 kilowatts en quatre à cinq minutes afin de recharger complètement les batteries embarquées.



Photos : UN today⁷ (à gauche) et canton de Genève (à droite)⁸.

Le système de trolleybus TOSA permet d'accueillir 133 passagers au maximum au moyen d'une propulsion 100 % électrique qui ne nécessite pas de recourir à des lignes aériennes. Les véhicules sont équipés de petites batteries légères (38 kWh) qui peuvent être montées sur le toit, ce qui permet d'utiliser pleinement la capacité de transport de passagers. À certains arrêts, un bras robotisé se déploie automatiquement à partir du toit du trolleybus pour se connecter à une station de recharge en hauteur, utilisant le procédé de recharge « éclair » pour recharger la batterie pendant l'intervalle de quinze secondes d'immobilisation nécessaire pour l'embarquement et le débarquement des passagers.

La technologie d'ABB, mise au point en partenariat avec d'autres acteurs clés, garantit non seulement une recharge rapide en quinze à vingt secondes, mais elle permet aussi d'accroître la capacité de transport et l'efficacité énergétique. Ce système de recharge éclair à haute puissance ne présente aucun risque car les connecteurs ne sont sous tension que lorsqu'ils sont enclenchés. Le projet TOSA apporte donc une solution élégante permettant de ne pas recourir aux champs électromagnétiques généralement utilisés dans les systèmes de recharge par induction.

Facteurs clés de succès

- Le système de trolleybus TOSA, silencieux et sans émissions, constitue une solution avantageuse de remplacement des autobus diesel et trolleybus traditionnels utilisant des lignes aériennes. Le problème esthétique que posent les lignes électriques aériennes, qui est souvent un obstacle à l'acceptation des trolleybus, n'aurait plus lieu d'être grâce à l'adoption d'une technologie de recharge éclair.
- La mise en œuvre de ce projet pilote est essentielle dans l'optique de l'amélioration de l'ensemble des politiques, normes et spécifications, ainsi que de la vérification de la faisabilité technique et des modèles d'exploitation.

Source : Centre d'études des politiques européennes (2016), Augé (2022).

⁷ <https://untoday.org/genevas-public-transportation-in-a-pandemic-world/>.

⁸ <https://www.ge.ch/dossier/bus-tosa-innovation-mobilite-au-service-genevois/ligne-23-premiere-mondiale/ligne-23>.

18. Le système de recharge non coordonné, qui se caractérise par le fait que les véhicules sont rechargés de façon indifférenciée dès leur connexion au réseau sans qu'il soit tenu compte des heures de forte demande, peut provoquer des perturbations du réseau. Le système coordonné de recharge des véhicules électriques peut être mis en place au moyen de trois méthodes distinctes : envoi d'un signal à chaque véhicule ; envoi d'un signal à un contrôleur centralisé supervisant les véhicules électriques sur un site désigné (par exemple, parc de stationnement ou centre de recharge et parcs de véhicules commerciaux dans les aires de stationnement d'entreprise) ; gestion par un agrégateur tiers chargé de coordonner les véhicules situés à différents endroits. Les agrégateurs peuvent servir d'unités centrales regroupant l'énergie collective de nombreux véhicules électriques. Leurs principales responsabilités consistent à surveiller, contrôler et appuyer le réseau en fournissant des services complémentaires essentiels. Les agrégateurs doivent élaborer des stratégies de répartition efficaces pour faire face à la demande d'utilisation des véhicules, réguler le niveau d'approvisionnement et accroître la rentabilité. La conception des infrastructures de recharge contribue de manière déterminante à la mise en place d'un système de recharge coordonné et à l'exploitation du potentiel d'un tel système. Une infrastructure de recharge performante et bien conçue doit tenir compte de facteurs tels que la localisation, la capacité et la connectivité. L'installation de stations de recharge de manière stratégique dans des lieux clefs, tels que des parcs de stationnement ou des centres commerciaux, peut faciliter le contrôle centralisé et la coordination du système de recharge des véhicules électriques.

19. Pour les véhicules utilitaires lourds tels que les camions électriques, les mêmes types de mécanismes et de technologies pourraient être utiles pour garantir la fiabilité du réseau et faciliter l'intégration des infrastructures de recharge pour les véhicules électriques. La stratégie appliquée pour les camions électriques repose généralement sur un retour à la base, les infrastructures de recharge étant situées aux points de départ et d'arrivée des itinéraires des camions généralement utilisés par les services de fret et de livraison. Bien que cette stratégie soit de plus en plus facile à appliquer et avantageuse, elle entraîne des difficultés liées à une forte demande d'infrastructures qui conduit à une augmentation des coûts et nécessite dans certains cas de moderniser les infrastructures électriques. C'est particulièrement vrai dans les zones géographiques qui comptent un grand nombre d'infrastructures, telles que les centres de distribution. Les difficultés liées à la recharge des parcs de camions électriques sur des sites commerciaux sont nettement plus complexes que celles qui concernent la recharge des véhicules légers de transport de personnes, caractérisée par le recours aux réseaux de distribution à basse tension et des périodes de recharge plus longues. Les camions électriques utilisent des batteries plus grandes et nécessitent une infrastructure de recharge à haute puissance, ce qui entraîne une augmentation importante du nombre de périodes de forte demande en comparaison avec les parcs de véhicules électriques. En outre, les horaires de fonctionnement stricts qui sont étroitement liés à la qualité de service d'une entreprise de logistique, par exemple, ont une incidence sur la disponibilité des véhicules pour la recharge, ce qui a des répercussions sur les pics de demande de recharge des parcs de camions électriques. Par ailleurs, les toits des bâtiments des entreprises qui utilisent des camions électriques sont souvent grands et plats, ce qui est très pratique pour installer des panneaux solaires à grande échelle. Adapter la production d'électricité en fonction de la demande de recharge sur le site de l'entreprise ou en fonction de la demande et de la production d'électricité des entreprises situées dans la même zone d'activité ouvre des perspectives intéressantes sur le plan de la recharge intelligente et des applications liées à la technologie V2G (Al-Hanahi *et al.* (2022)) (WDP (2022)).

20. La mise en place des systèmes V2G se heurte à plusieurs contraintes et doit tenir compte de plusieurs aspects nécessitant une attention particulière pour une intégration réussie. Il s'agit notamment de l'usure et de la dégradation des batteries au fil du temps, de la disponibilité limitée des stations de recharge et des équipements connexes, du montant élevé des investissements initiaux et de la nécessité de mettre en place des protocoles normalisés et d'assurer une bonne interopérabilité.

21. Les batteries des véhicules électriques, bien qu'elles soient conçues pour permettre l'obtention de bonnes performances, perdent progressivement de leur capacité au fil du temps. Les cycles de charge et de décharge fréquents associés à la recharge intelligente et aux fonctions V2G peuvent accélérer ce processus de dégradation, réduisant ainsi la durée de vie de la batterie et son efficacité générale. Pour atténuer ce problème, il faut surveiller et

contrôler soigneusement l'état de la batterie, utiliser des systèmes avancés de gestion de la batterie et adopter des stratégies de recharge qui permettent d'en prolonger la durée de vie. Des activités de recherche-développement sont menées actuellement en vue d'améliorer cette technologie et de prolonger la durée de vie des batteries des véhicules électriques.

22. L'adoption généralisée des systèmes V2G nécessite la mise en place d'un vaste réseau d'infrastructures de recharge intelligente. Actuellement, les infrastructures de recharge en sont souvent aux premiers stades de développement et les infrastructures déjà mises au point ne disposent pas des fonctionnalités normalisées nécessaires pour prendre en charge les systèmes de recharge intelligente et les applications liées à la technologie V2G.

23. L'intégration efficace des systèmes de recharge intelligente et V2G repose sur des protocoles normalisés et sur l'interopérabilité entre les différents modèles de véhicule électrique, les fournisseurs d'infrastructures de recharge, les gestionnaires de réseaux et les acteurs du marché de l'énergie. Il est essentiel d'assurer une communication et une compatibilité continues entre les différents systèmes et les différentes parties prenantes pour garantir l'efficacité des fonctions V2G. L'établissement de normes techniques communes, notamment pour les protocoles de communication et les interfaces permettant les échanges d'électricité, contribue à l'interopérabilité et favorise l'harmonisation du système V2G. Les acteurs de ce secteur, les organismes de réglementation et les organisations de normalisation doivent travailler en collaboration pour relever ce défi et permettre une large adoption de ces normes. La norme ISO15118-20 est un exemple de méthode qui facilite la normalisation des protocoles de données afin d'accroître l'interopérabilité.

24. La mise en place des systèmes de recharge intelligente et V2G nécessite l'adoption d'un cadre réglementaire et stratégique favorable permettant de lever les obstacles juridiques et commerciaux à cette évolution. Il est essentiel d'établir des réglementations claires en matière de connexion au réseau, de tarification de l'électricité et de participation au marché de l'énergie en ce qui concerne les véhicules électriques afin d'encourager l'adoption généralisée de ces systèmes. En outre, l'établissement de principes directeurs concernant la confidentialité des données, la cybersécurité et les questions de responsabilité liées aux activités dans ce cadre devrait garantir la protection des droits des consommateurs et assurer l'intégrité du système.

D. Conclusion

25. L'intégration efficace des infrastructures de recharge des véhicules électriques dans le système énergétique, en particulier grâce à l'utilisation de la technologie V2G, constitue une solution prometteuse permettant d'accroître la fiabilité, la stabilité et les performances économiques des sources d'énergie renouvelables. Les systèmes V2G peuvent contribuer de manière notable à la création d'un réseau énergétique durable et résilient sur la base d'une gestion efficace des flux d'énergie, d'une incitation des propriétaires de véhicule électrique à participer et d'une réalisation du potentiel offert par les agrégateurs. L'intégration de ces infrastructures permet de limiter la dépendance à l'égard des centrales électriques traditionnelles, de favoriser l'adoption généralisée des énergies renouvelables et d'ouvrir la voie à des réseaux de transport et à des systèmes énergétiques plus durables.

E. Recommandations

26. Il est important de comprendre et de faire savoir qu'investir dans le développement du secteur des véhicules électriques, c'est investir de façon stratégique dans la mise en place d'un système énergétique écologique. La transition vers la mobilité électrique permet d'intégrer de manière efficace les sources d'énergie renouvelables. En mettant en évidence les avantages de cette évolution pour l'environnement et le système énergétique, les décideurs et les parties prenantes peuvent établir des priorités et allouer des ressources de manière à favoriser la croissance du secteur de la mobilité électrique.

27. Au moment de la conception des infrastructures de recharge, il est essentiel de ne pas se focaliser uniquement sur les avantages qu'en retireront les conducteurs de véhicules électriques. Il faudrait plutôt tenir compte des objectifs et des exigences plus larges associés

à la transformation du système énergétique. L'intégration des infrastructures de recharge dans la conception globale du système énergétique permet de tirer le meilleur parti des énergies renouvelables et de limiter la saturation du réseau.

28. Au moment de la mise en place initiale des infrastructures de recharge, il est essentiel de songer aux besoins liés à la recharge intelligente et aux capacités du système V2G. La prise en compte de ces caractéristiques permet de jeter les bases d'un système énergétique flexible et intelligent.

III. Sécurité des véhicules et des infrastructures de recharge

29. Étant donné que les véhicules électriques continuent de se démocratiser, il est important d'évaluer les avantages en matière de sécurité ainsi que les risques potentiels associés à ce type de véhicules. La présente section a pour objet d'analyser les aspects liés à la sécurité et de mettre en évidence les avantages et les risques potentiels associés à l'utilisation des véhicules électriques. Une bonne compréhension de ces différents facteurs permettra aux parties prenantes de prendre leurs décisions en connaissance de cause et d'élaborer des mesures et des stratégies appropriées en matière de sécurité en vue d'une adoption des véhicules électriques dans des conditions satisfaisantes.

A. Avantages des véhicules électriques en matière de sécurité^{9, 10}

30. Les essais de choc indiquent que les voitures électriques sont comparables aux voitures conventionnelles en termes de sécurité. Les véhicules électriques sont soumis aux mêmes normes de sécurité que les véhicules traditionnels. En cas d'accident, la sécurité des piétons et des cyclistes dépend de facteurs tels que la conception de la voiture et la mise en place de systèmes de sécurité intégrés.

31. Du point de vue de la sécurité, l'un des principaux avantages des véhicules électriques est qu'ils disposent d'un centre de gravité plus bas, l'emplacement du bloc-batterie étant généralement situé dans la partie inférieure du véhicule. Grâce à une répartition uniforme du poids sur l'ensemble de la voiture, les véhicules électriques ont une base stable, ce qui réduit le risque de basculement ou de renversement, même en cas de collision à grande vitesse. À l'inverse, les éléments lourds des voitures à essence traditionnelles, tels que le moteur et le réservoir de carburant, sont situés dans la partie haute du véhicule, ce qui augmente le risque de basculement. En outre, l'abaissement du centre de gravité améliore la maniabilité et les performances des véhicules électriques. Grâce à une meilleure répartition du poids, ces véhicules peuvent tourner et prendre des virages plus rapidement avec souplesse, ce qui réduit le risque de perte de contrôle. Au bout du compte, cela contribue à la sécurité routière de manière générale.

32. Les véhicules électriques bénéficient d'un couple instantané, c'est-à-dire de la capacité du moteur électrique à fournir un couple maximal depuis l'arrêt. Cette caractéristique présente plusieurs avantages sur le plan de la sécurité. Tout d'abord, elle permet aux conducteurs d'accélérer rapidement et de s'insérer facilement sur les autoroutes, ce qui contribue à éviter les accidents dus à la lenteur de l'accélération. En outre, le couple instantané améliore la capacité à réagir rapidement face aux obstacles se présentant sur la route, tels que des débris ou des animaux, ce qui renforce encore la sécurité.

33. Le système de freinage à récupération est une technologie propre aux véhicules électriques, qui leur permet de capter et de stocker l'énergie pendant le processus de freinage. Lorsque le conducteur freine, le moteur électrique tourne en sens inverse, convertissant l'énergie cinétique en énergie électrique, qui est ensuite stockée dans la batterie. Le freinage à récupération offre plusieurs avantages en matière de sécurité. Tout d'abord, il peut contribuer à prévenir les accidents causés par une défaillance ou un mauvais fonctionnement

⁹ <https://www.agendalaadinfrastructuur.nl/ondersteuning+gemeenten/documenten+en+links/documenten+in+bibliotheek/handlerdownloadfiles.ashx?idnv=1930035>.

¹⁰ <https://steerev.com/steer-vs-other/8-reasons-why-electric-vehicles-are-safer-than-traditional-cars/>.

des freins. En utilisant le moteur électrique pour ralentir le véhicule, le freinage à récupération réduit l'usure du système de freinage traditionnel, prolongeant ainsi la durée de vie des freins et évitant leur surchauffe ou leur défaillance.

34. Contrairement aux véhicules traditionnels à moteur à combustion interne, les véhicules électriques sont propulsés par un moteur électrique fonctionnant grâce à l'électricité stockée dans une batterie. Cette distinction présente plusieurs avantages en matière de sécurité. Tout d'abord, les véhicules électriques ne possèdent pas de système d'alimentation en carburant, ce qui élimine le risque de fuite ou d'inflammation du carburant en cas d'accident. Par conséquent, les risques d'incendie sont considérablement réduits. Les batteries des véhicules électriques sont sûres et intègrent des dispositifs de sécurité permettant de réduire encore davantage les risques d'incendie.

B. Risques potentiels en matière de sécurité¹¹

35. Endommagement de la batterie – Bien que le risque d'emballement thermique des batteries de véhicule électrique endommagées soit faible, d'après les essais pratiques réalisés, il s'agit toutefois d'un risque potentiel à prendre en compte. L'emballement thermique désigne une augmentation incontrôlée de la température à l'intérieur d'un élément de batterie, qui entraîne généralement des phénomènes thermiques dangereux tels que des incendies ou des explosions. Des dommages internes ou des courts-circuits sont susceptibles de déclencher un emballement thermique.

36. Sécurité incendie – Le risque d'incendie dans les voitures électriques n'est pas plus élevé que dans les voitures traditionnelles. La libération de diverses matières lors d'un incendie est globalement la même, mais les voitures électriques peuvent émettre davantage de fluorure d'hydrogène, susceptible de provoquer une irritation de la peau. Toutefois, les batteries des véhicules électriques sont sûres et intègrent des dispositifs de sécurité destinés à prévenir les incendies. En cas d'emballement thermique ou d'incendie dans des véhicules électriques, les pompiers se heurtent à des difficultés particulières en raison de la structure et des caractéristiques des batteries au lithium ionique. Diverses méthodes ont été envisagées pour faire face à ces situations, mais il est important de comprendre leurs limites ainsi que les risques qu'elles peuvent présenter. En voici quelques-unes¹² :

- Les mousses anti-incendie sont couramment utilisées pour étouffer les incendies et refroidir la zone environnante. Cependant, la mousse ne permet pas d'arrêter un emballement thermique dans un véhicule électrique. Les éléments de batterie sont situés à l'intérieur d'un boîtier étanche et résistant au feu, tant et si bien qu'ils sont difficilement atteints par la mousse. En outre, les éléments des batteries au lithium ionique n'ont pas besoin d'un apport en oxygène extérieur pour brûler et la mousse n'est donc pas un moyen efficace d'éteindre ce type d'incendie ;
- Les couvertures d'incendie sont généralement utilisées pour étouffer les incendies en les privant d'oxygène. Toutefois, il est vain de tenter d'étouffer un incendie dans un élément de batterie au lithium ionique, qui n'a pas besoin d'oxygène atmosphérique pour brûler. Les couvertures d'incendie peuvent seulement être utilisées pour contenir l'incendie ou comme protection contre l'exposition, mais des précautions doivent être prises en raison des gaz nocifs et inflammables émis par les éléments de batterie ;
- Une lance perforatrice est un outil spécialisé utilisé pour lutter contre les incendies de véhicules électriques. Elle permet de percer le boîtier ou le compartiment dans lequel se situe la batterie afin de pouvoir amener directement de l'eau sur la source de l'incendie. La pointe acérée de la lance crée une ouverture qui permet aux pompiers de refroidir les éléments de batterie en surchauffe et d'empêcher la propagation de l'incendie. Toutefois, l'utilisation de lances perforatrices présente des risques tels que l'électrocution ou la survenue de défaillances supplémentaires au niveau des éléments

¹¹ <https://www.agendalaadinfrastructuur.nl/ondersteuning+gemeenten/documenten+en+links/documenten+in+bibliotheek/handlerdownloadfiles.aspx?idnv=1930035>.

¹² <https://www.firerescue1.com/electric-vehicles/articles/developing-sops-for-electric-vehicles-incidents-CbHhgn5759QnLDv3/>.

de batterie. Les fabricants de véhicules électriques déconseillent de tenter d'accéder à l'intérieur du boîtier de la batterie, car cela peut être dangereux et causer des dommages supplémentaires. Compte tenu des limites de ces méthodes, la meilleure solution consiste à laisser la batterie se consumer d'elle-même.

37. Absence de bruit – Les véhicules électriques sont moins bruyants que les véhicules traditionnels à moteur à combustion interne, ce qui soulève des inquiétudes quant à la sécurité des piétons, en particulier lorsque les véhicules circulent à faible vitesse. Pour pallier ce problème, le système avertisseur sonore de présence pour véhicule silencieux a été introduit, ainsi que le prévoit le Règlement ONU n° 138 relatif aux véhicules à moteur silencieux. Le système avertisseur sonore produit des sons artificiels ressemblant à ceux d'un moteur traditionnel afin d'indiquer la présence du véhicule aux piétons et aux autres usagers de la route, ce qui améliore la sécurité, particulièrement en milieu urbain. Cependant, au-delà d'une certaine vitesse, la différence entre le bruit émis par les véhicules électriques et les véhicules traditionnels diminue, le bruit des pneus devenant le principal signal sonore. À des vitesses plus élevées, cette différence disparaît complètement.

38. Immersion dans l'eau – Les batteries des voitures électriques sont conçues pour fonctionner même lorsqu'elles sont totalement immergées dans l'eau. Il existe une distinction entre les situations d'immersion totale et partielle, qui tient au manque d'oxygène. Les situations d'inondation ou d'exposition à de l'eau salée ou polluée font l'objet de principes directeurs. Toutefois, les inondations ne donnent pas toujours lieu à une immersion totale.

C. Gestion de la sécurité¹³

39. La présente section traite de la gestion de la sécurité en cas d'accident impliquant des véhicules électriques. Elle porte notamment sur les programmes de formation à l'intention des services de lutte contre les incendies, les stratégies de gestion des accidents, les considérations relatives à la sécurité du personnel de maintenance et les mesures de sécurité s'appliquant aux infrastructures de recharge.

40. Formation – Il est fortement recommandé aux services de lutte contre les incendies de mettre en œuvre, en priorité, des programmes de formation spécialisés concernant les moyens de faire face aux accidents donnant lieu à l'incendie d'un véhicule électrique. Les programmes de formation devraient traiter un large éventail de questions, à commencer par le recensement des différents types de véhicules électriques et la compréhension de la composition chimique et des caractéristiques de leurs batteries. La mise en œuvre de stratégies de lutte contre l'incendie adaptées aux accidents de véhicules électriques repose sur ces connaissances. L'accent devrait être placé sur la formation des pompiers aux dangers potentiels associés aux systèmes à haute tension, ainsi qu'aux risques d'emballement thermique et de libération de gaz nocifs. Des exercices pratiques et des simulations devraient être intégrés dans le programme de formation afin de fournir une expérience pratique quant à la manière de gérer et d'éteindre les incendies de véhicule électrique en toute sécurité. Ces exercices devraient mettre l'accent sur une utilisation appropriée de l'équipement de protection individuelle, ainsi que sur les techniques de gestion des accidents et la mise en place d'une coordination efficace avec les autres organismes concernés.

41. Gestion des accidents – La gestion des accidents diffère pour les véhicules électriques car ils ont un comportement au feu bien particulier et peuvent s'enflammer une seconde fois. La reconnaissance des véhicules électriques et la localisation des batteries posent des difficultés aux gestionnaires d'accidents. Les caméras thermiques et les applications d'information sur les véhicules peuvent aider à déterminer l'emplacement du bloc-batterie. Les organismes de secours, les assureurs et les services d'incendie poursuivent leur collaboration en vue d'élaborer des protocoles permettant de gérer de manière sûre des voitures électriques qui sont en feu ou risquent de l'être.

¹³ <https://www.osti.gov/biblio/1877784>.

42. Sécurité lors de la maintenance – Une formation adéquate est nécessaire pour que le personnel des services d’assistance routière, des services d’urgence et des garages puisse travailler en toute sécurité avec des voitures électriques. Ces formations s’appuient sur des principes directeurs concernant les risques de sécurité liés aux systèmes à haute tension.

43. Sécurité des infrastructures de recharge – Les infrastructures de recharge des véhicules électriques présentent des défis en matière d’atténuation des risques. Les systèmes de recharge sont considérés comme sûrs en raison des dispositifs de sécurité intégrés et du respect des réglementations et des normes techniques existantes. Les capteurs utilisés pour la détection des collisions et les systèmes de sécurité sont conçus de manière à réduire les risques au cours de la recharge. La conformité de l’installation ainsi que la prise en compte de la capacité constituent des éléments essentiels pour garantir la sécurité des infrastructures de recharge.

D. Cybersécurité

44. Incidence potentielle des cyberattaques : une cyberattaque réussie sur des points de recharge de véhicules électriques à haute puissance est susceptible de perturber le processus de recharge, de compromettre les données des utilisateurs ou même de causer des dommages physiques à l’infrastructure de recharge elle-même. Les cyberattaques visant les véhicules électriques et les infrastructures de recharge peuvent donner lieu à des vols ou à un accès non autorisé aux données financières et personnelles des propriétaires ou des utilisateurs de véhicules électriques. Ce type d’attaque peut également ouvrir la voie à des usurpations d’identités, des fraudes ou des pertes financières. En outre, une cyberattaque visant les infrastructures de recharge des véhicules électriques peut perturber le processus de recharge, entraînant l’impossibilité de recharger les véhicules. Dans les cas les plus graves, une cyberattaque sophistiquée peut donner lieu à la coupure complète de tout un réseau de recharge. Cela peut occasionner des désagréments pour les propriétaires et les utilisateurs de véhicules électriques, restreindre leur mobilité et entraver l’adoption et l’acceptation de ce type de véhicule. Les cyberattaques contre les véhicules électriques ou les infrastructures de recharge sont susceptibles de saper la confiance des consommateurs dans la sécurité et la fiabilité des véhicules électriques. Le fait que les véhicules électriques soient perçus comme étant vulnérables aux cybermenaces peut décourager les acheteurs potentiels d’adopter des solutions de mobilité électrique, ralentissant ainsi la transition vers un système de transport durable.

45. Les stations de recharge pour véhicules électriques sont généralement situées sur les lieux de travail, dans les espaces publics et dans d’autres lieux accessibles. En raison de leur connectivité à Internet et à d’autres réseaux, elles constituent un point d’entrée permettant à des pirates informatiques d’exploiter les vulnérabilités et d’obtenir un accès non autorisé. Les cyberattaques visant les véhicules électriques ou les infrastructures de recharge peuvent exploiter les vulnérabilités pour permettre un accès non autorisé aux systèmes informatiques qui y sont connectés. Les pirates informatiques peuvent ainsi accéder à des données sensibles en s’introduisant dans les systèmes d’organisations ou d’organismes publics. Lorsque des infrastructures critiques sont ciblées, notamment les systèmes de transport, les services d’urgence et l’industrie manufacturière, les conséquences des cyberattaques peuvent être graves. Une attaque contre les systèmes de transport pourrait perturber le trafic et avoir des répercussions sur la circulation des marchandises et de personnes. De même, les services d’urgence, s’ils étaient ciblés, risqueraient de ne plus pouvoir réagir efficacement face aux crises et aux situations d’urgence. Des attaques contre des sites de production peuvent avoir pour conséquence de perturber les chaînes de production et entraîner des pertes économiques considérables.

46. L’intégration de technologies visant à la mise en place d’un réseau électrique intelligent offre nombre d’avantages, notamment l’optimisation de la recharge, l’équilibrage de la charge et la gestion efficace de l’énergie. Cependant, cette intégration s’accompagne de l’introduction de nouveaux vecteurs d’attaques, avec tous les risques potentiels qui y sont associés. Les technologies visant à la mise en place d’un réseau électrique intelligent reposent sur des réseaux de communication et des échanges de données entre les véhicules électriques, l’infrastructure de recharge et le réseau électrique. Toute vulnérabilité au niveau de ce

système interconnecté est susceptible d'être exploitée par des cybercriminels cherchant à compromettre l'intégrité du réseau électrique ou à perturber son fonctionnement. Les cyberattaques peuvent en particulier cibler certains composants des véhicules électriques, tels que les batteries, dans le but de les endommager ou de compromettre leur fonctionnement. Le fait de modifier les paramètres de recharge des batteries ou de contourner les mécanismes de sécurité peut entraîner des dommages, une baisse de performance, voire des risques pour la sécurité des conducteurs.

47. Un système d'identification inadéquat ou l'absence de systèmes d'alarme en cas d'accès aux compartiments internes des véhicules électriques ou aux infrastructures de recharge rend vulnérable face aux attaques. Cela signifie qu'un accès physique non autorisé à des composants essentiels, tels que la batterie ou les systèmes de contrôle, est susceptible de ne pas être détecté. Le risque est que des pirates informatiques parviennent à exploiter cette faiblesse pour altérer ou compromettre l'intégrité des composants, ce qui aboutirait à un contrôle non autorisé du véhicule ou à une perturbation du fonctionnement des infrastructures de recharge. Le stockage non chiffré de données sensibles, telles que les informations personnelles et les identifiants, induit un risque important en matière de sécurité. Si des pirates parviennent à accéder aux systèmes de stockage des données, ils peuvent alors facilement récupérer et exploiter ces informations à des fins d'usurpation d'identité, de fraude financière ou d'accès non autorisé à des systèmes et réseaux connectés. Le cryptage constitue une mesure essentielle à appliquer pour protéger la confidentialité et l'intégrité des données, sachant que l'absence de cryptage augmente la probabilité de violation et de compromission de ces données. L'installation de matériel ou de logiciels malveillants dans les véhicules électriques ou les infrastructures de recharge peut avoir de graves conséquences. Les pirates informatiques peuvent installer des dispositifs ou des logiciels non autorisés dans le but de manipuler ou d'exploiter les systèmes, notamment en compromettant des transactions financières ou en redirigeant des fonds vers d'autres comptes par falsification. De tels actes peuvent entraîner des pertes financières pour les personnes ou les organisations associées à des transactions liées aux véhicules électriques et ébranler la confiance dans la sécurité des processus financiers au sein de l'écosystème des véhicules électriques.

48. ESPACE RÉSERVÉ POUR UNE INSERTION ULTÉRIEURE : (Informations concernant les mesures, la gouvernance et les politiques en matière de cybersécurité (libellé à préciser)). La présente section est en cours de rédaction et comprendra des informations sur les éléments suivants :

- Mise en application de protocoles de communication sécurisés pour protéger la transmission des données ;
- Intégration de mécanismes d'authentification rigoureux visant à empêcher tout accès non autorisé ;
- Utilisation de techniques de cryptage visant à protéger les informations sensibles ;
- Intégration de systèmes de détection et de prévention des intrusions visant à détecter et à atténuer les cybermenaces ;
- Adoption de mises à jour logicielles sans fil (« over-the-air », OTA) sécurisées visant à apporter des correctifs de sécurité en temps voulu.

49. ESPACE RÉSERVÉ POUR UNE INSERTION ULTÉRIEURE : (Gouvernance et politiques en matière de cybersécurité). La présente section est en cours de rédaction et comprendra des informations sur les éléments suivants :

- Rôle des organismes de réglementation et des normes sectorielles dans l'établissement de cadres en matière de cybersécurité ;
- Élaboration de politiques globales visant à faire face aux risques en matière de cybersécurité dans le cadre de la fabrication, de la mise sur le marché et de l'utilisation des véhicules électriques ;
- Collaboration entre les pouvoirs publics, les acteurs du secteur et les experts en cybersécurité afin d'élaborer des cadres solides dans ce domaine ;
- Vérifications et évaluations régulières visant à garantir le respect des principes directeurs et des réglementations en matière de cybersécurité.

50. ESPACE RÉSERVÉ POUR UNE INSERTION ULTÉRIEURE : (Gestion des données relatives aux véhicules électriques (libellé à préciser)). La présente section est en cours de rédaction et comprendra des informations sur les éléments suivants :

- Utilité de la gestion des données dans le cadre de l'optimisation des véhicules électriques tout au long de la chaîne de valeur, notamment en ce qui concerne le niveau de charge ;
- Recours aux données dans le cadre des services destinés aux véhicules électriques, tels que la recharge intelligente et la technologie V2G ;
- Besoins en matière de qualité des données et d'éléments liés à la calibration ;
- Éléments liés à l'architecture des données tout au long de la chaîne de valeur dans le domaine de la recharge des véhicules électriques, notamment en ce qui concerne : les données relatives à la planification ; les données relatives à la construction et à la réalisation ; les données relatives au fonctionnement ; les métadonnées ; les données relatives à l'utilisation et aux transactions ; les données relatives à la gestion de la configuration ; les données relatives à l'entretien et à la maintenance ; les données concernant l'établissement de rapports ; les prescriptions en matière de normalisation et d'harmonisation (notamment les identifiants uniques pour les points de recharge, une terminologie commune à tous les acteurs et des activités de suivi dans les différents secteurs, y compris le secteur de l'énergie).

IV. Conclusions, recommandations et prochaines étapes

51. Il ne fait aucun doute qu'il faut mettre en place sans tarder un système de transport durable. Dans de nombreuses régions, la transition vers un tel système a été enclenchée dans le but de réduire les émissions de CO₂ et d'améliorer la qualité de l'air. Le bien-fondé et l'urgence de cette démarche ont été démontrés par la science et sont reconnus par de nombreux États Membres de l'Organisation des Nations Unies. Cela s'est traduit par des engagements assortis d'objectifs concrets, énoncés dans les contributions déterminées au niveau national (CDN) de chaque pays.

52. Les États déploient différents moyens d'action à l'appui des CDN, mais ils se heurtent à des incertitudes. Dans le même temps, les pouvoirs publics et les décideurs ont recours à des mesures d'incitation réglementaires, fiscales et financières afin de stimuler l'offre et la demande de véhicules électriques et d'infrastructures de recharge en vue d'atteindre les objectifs établis dans les CDN. Ces cadres stratégiques et réglementaires s'inscrivent souvent dans une dynamique plus large en faveur de la transition énergétique, qui englobe la baisse de la consommation, la production durable et l'abandon du gaz et du pétrole dans tous les secteurs, du chauffage domestique aux méthodes de production industrielle. Chaque pays fait face à des défis différents et cherche à trouver un équilibre optimal pour atteindre les objectifs établis dans ses CDN ; tous ont beaucoup à apprendre les uns des autres.

53. Les moyens de transport électriques alimentés par des batteries constituent la solution optimale. L'électrification des transports terrestres au moyen de batteries s'est à ce jour imposée comme la voie la plus prometteuse et la plus efficace pour parvenir à une mobilité sans émissions. De nombreux types de carburants de remplacement à faible intensité de carbone ont fait l'objet de recherches et sont mis au point actuellement, mais si l'on prend en considération l'efficacité et l'empreinte carbone, les moyens de transport électriques alimentés par batterie constituent dans la plupart des cas la meilleure solution pour atteindre les objectifs climatiques. Les carburants de remplacement ou d'autres vecteurs énergétiques sont encore considérés comme utiles pour certains modes de transport, et de nombreuses activités de recherche sont encore menées actuellement pour en améliorer l'efficacité. Bien que des défis importants subsistent concernant la chaîne de valeur des systèmes de propulsion électrique à batterie (production entièrement durable, utilisation de matériaux essentiels, recyclage et gestion des déchets), la communauté scientifique s'accorde à dire que l'électrification reposant sur les batteries est actuellement la solution optimale pour des systèmes de transport sans aucune émission.

54. Les moyens de transport électriques alimentés par des batteries sont devenus une composante bien établie de la transition énergétique. La situation dans ce secteur reflète cette évolution : les constructeurs automobiles ont investi massivement dans la production de véhicules électriques à batterie, les entreprises de production d'électricité ont montré qu'elles pouvaient améliorer considérablement les parcs solaires et éoliens, les constructeurs ne prévoient plus d'utiliser le cobalt pour la conception de batteries et se tournent, par exemple, vers des batteries solides à base de silicium présentant des caractéristiques impressionnantes, tandis que de nombreuses initiatives en matière de recyclage des batteries sont lancées afin de donner aux matériaux rares une seconde vie et de les réutiliser. Des interactions bidirectionnelles entre les véhicules électriques et le réseau électrique doivent encore être mises en place à grande échelle, mais les possibilités qu'offrent les véhicules électriques pour favoriser la transition vers la production d'électricité à partir de sources renouvelables, aussi bien en matière de volume que de profils d'approvisionnement quotidien, sont considérables.

55. Les batteries des véhicules électriques s'inscrivent dans le cadre d'une transition énergétique plus vaste vers un système entièrement flexible, car si elles consomment de l'énergie, elles peuvent également en stocker. L'électrification du système de transport a ceci de particulier qu'elle fait naître une collaboration avec le système énergétique (et a des effets sur celui-ci). La présence d'un parc de véhicules électriques à batterie a une incidence à la fois sur la production, sur le réseau électrique et sur la consommation. Non seulement la quantité de kilowattheures augmente, mais le profil d'utilisation se transforme de manière radicale. Si l'on ajoute à cela l'évolution de la courbe de production des énergies solaire et éolienne et d'autres initiatives telles que l'abandon du chauffage au gaz au profit des pompes à chaleur, on comprend que le réseau électrique et les compagnies d'électricité doivent faire face à un défi sans précédent. Il est donc essentiel de fournir des données fiables sur l'électrification des transports, pour tous les modes, afin de compléter les prévisions concernant les besoins en matière de production et de distribution. Il est également important de trouver des solutions permettant de limiter les pics de demande sur le réseau et d'éviter ainsi des investissements coûteux. La recharge intelligente (V1G) est considérée comme une fonctionnalité par défaut à cet égard, car elle permet de réduire le volume de recharge pendant les pics de consommation ou de déplacer les heures de recharge en dehors de ces périodes. La solution V2G est la plus avancée car elle permet aux véhicules de réinjecter de l'électricité dans le réseau. Il s'agit là de moyens très efficaces de réduire l'incidence des véhicules électriques sur le réseau mais aussi d'apporter une contribution positive à l'équilibre du réseau et aux profils d'utilisation. Pour que les marchés actuels exploitent au mieux cette fonctionnalité, des modèles d'activité et un cadre adéquats devront être élaborés. La chaîne de valeur du secteur de l'énergie et celle du secteur des transports sont toutes deux concernées par la recharge intelligente et devront être davantage interconnectées pour tirer pleinement parti des possibilités ainsi offertes. De nouvelles questions se posent également en raison de la généralisation des moyens de transport électriques : quels sont les meilleurs modèles d'infrastructure de recharge lorsque les véhicules électriques constituent une part importante des parcs de véhicules ? Comment gérer les questions liées à la propriété des données et à l'échange de données susceptibles de poser des problèmes de confidentialité et d'autres questions de cybersécurité ? Chaque pays devra trouver des réponses et la CEE pourra aider les gouvernements à mettre en commun les meilleures pratiques et à fournir des orientations en vue d'harmoniser les cadres réglementaires et commerciaux.

56. Compte tenu de la taille et de l'importance considérables du secteur du transport multimodal dans la région de la CEE, qui est composée de pays aux caractéristiques variées, l'électrification de ce secteur reste essentielle pour l'amélioration de la connectivité. Pour parvenir à l'électrification du transport multimodal, laquelle repose sur la participation de différents acteurs, il faut mettre en place des infrastructures de recharge interopérables et des protocoles normalisés. Quoique particulièrement difficile à relever, ce défi peut aussi être vu comme un moyen de promouvoir plus efficacement les véhicules électriques et l'adoption d'une approche cohérente et harmonisée.

57. Dans le secteur du transport par voie navigable, l'électrification apparaît comme l'une des principales stratégies permettant de rendre les flottes plus écologiques. Le recours à des batteries pour la propulsion des bateaux de navigation intérieure est considéré comme une solution viable pour atteindre l'objectif d'une flotte sans aucune émission. Les solutions hybrides associant des batteries et des piles à combustible à hydrogène offrent des

perspectives prometteuses en ce qui concerne les défis liés aux voyages de longue durée et aux limitations du stockage de l'énergie. Toutefois, le succès de l'électrification dépend fortement de la capacité de fournir de l'électricité à quai dans les ports. La mise en place actuelle de systèmes d'alimentation électrique à quai, en particulier dans l'Union européenne, témoigne d'une tendance positive en réponse à ce besoin. En outre, des projets visant à mettre au point et à tester ces technologies sont en cours, signe que le secteur passe à la vitesse supérieure. Pour garantir la sécurité et l'efficacité des systèmes, il est impératif d'établir des normes harmonisées régissant leur mise sur le marché et leur fonctionnement. Par conséquent, les recommandations vont dans le sens d'une poursuite proactive de l'électrification des bateaux et du développement des infrastructures, mais l'accent est aussi mis sur l'établissement de normes fiables permettant d'encadrer cette transition. Les organismes publics, les organisations internationales, les compagnies maritimes et les fournisseurs de technologie devraient collaborer pour intensifier leurs efforts et concrétiser l'idée d'une flotte de navigation intérieure sans aucune émission.

58. La mise en commun des meilleures pratiques et l'adoption de normes ouvertes et d'outils réglementaires harmonisés à l'échelle mondiale sont les meilleurs moyens de lutter contre les incertitudes et de se préparer à toute évolution future du marché. La transition vers des systèmes de transport durables concerne tous les acteurs de la chaîne de valeur et touche même d'autres secteurs tels que l'électricité et l'aménagement du territoire. En cette période de transition, il est difficile de définir un modèle de marché pour l'avenir. Pour reproduire les meilleures pratiques, assurer l'harmonisation et la compatibilité entre les pays et appuyer les divers modèles de marché dans les différents pays, il est primordial de mettre en place des normes ouvertes, des protocoles et des outils réglementaires harmonisés à l'échelle mondiale. Cela permettra d'emprunter la voie la plus efficace aux fins de la transition et de disposer de la souplesse nécessaire pour évoluer vers un modèle de marché optimal qui assurera les connexions entre les pays de la région de la CEE, et au-delà. Un grand nombre de normes et de protocoles sont en cours d'élaboration, et certains sont déjà utilisés pour appuyer les initiatives actuelles d'électrification. La CEE peut jouer un rôle précieux dans les échanges de meilleures pratiques, contribuer à la mise en place d'un cadre réglementaire harmonisé et jeter les bases de la transition énergétique.

59. La réussite de l'électrification des systèmes de transport nécessite d'adopter une approche harmonisée et axée sur le conducteur aux fins de la mise en place des infrastructures de recharge. L'harmonisation entre les pays et le besoin, sous-jacent, de disposer de normes ouvertes et de protocoles peuvent déboucher sur des cas d'utilisation concrets relatifs à la facilité de paiement, à l'accès à chaque station de recharge, à la transparence des prix et à la qualité des services de navigation et d'information. La CEE peut contribuer à la convergence des cadres réglementaires afin de garantir l'adoption d'une approche axée sur le conducteur et peut également apporter des solutions aux problèmes de mise en application qui se posent dans ce domaine novateur pour lequel aucune réglementation n'a encore été établie.

60. Rôles que pourrait jouer la CEE à l'avenir – Afin de favoriser les progrès dans le domaine de la mobilité électrique, il est fortement recommandé que la CEE établisse une équipe spéciale chargée de diriger et de coordonner les activités liées au développement des véhicules électriques au sein de la CEE et en collaboration avec d'autres institutions. Cette équipe spéciale devrait se voir confier un mandat bien défini destiné à relever les défis majeurs et à tirer parti des principales possibilités dans le secteur des véhicules électriques, notamment en ce qui concerne la normalisation, les cadres réglementaires, la mise en place des infrastructures et les incitations du marché. Elle pourrait ainsi contribuer de manière notable à l'harmonisation de modèles de marché en constante évolution et aux mesures de gouvernance publique visant à faciliter un déploiement orienté par le marché. En outre, elle devrait donner la priorité à la promotion de la coopération intersectorielle et collaborer activement avec les représentants du secteur pour favoriser les échanges de connaissances et l'innovation. Les besoins précis en matière de ressources dépendront de la nature et de l'ampleur des activités de l'équipe spéciale, mais il est recommandé que celle-ci dispose d'au moins un équivalent temps plein pour diriger et coordonner ces activités.