

III. Rapport du lot de travail no. 3

Démonstration de mobilité durable

Membres :

Barbara Koch, directrice de la chaire de télédétection et des systèmes d'information géographique (FeLis), directrice du centre d'innovation Steinbeis InnoSUN

Adem Uğurlu, coordinateur de projet, FeLis - Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Wolfgang Brozio, FeLis – Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Kristina Bach, FeLis - Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Nicolas Krier, FeLis - Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Natasha Gapare FeLis - Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Silke Kilius, FeLis - Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Vulla Parasote, directrice générale de TRION Climate

Jeanne Le Chanony, TRION-climat

Sylvia Husel, TRION-climat

Max Krauter, TRION-climat

Sinje Starck, TRION-climat

Simon Faivre, TRION-climat

Victoria Axen, TRION-climat

III.1. Mobilité durable

Afin de dresser un état des lieux cartographique de la mobilité durable en Suisse, en France et en Allemagne, TRION-climate e.V. a mené une enquête sur la mobilité durable auprès des collectivités territoriales de la région du Rhin supérieur. Les objectifs étaient multiples :

- Identifier les meilleures pratiques en matière de mobilité durable,
- Recenser le nombre et la répartition des différents types de véhicules dans les flottes des collectivités territoriales,
- Faire le point sur les développements futurs et les projets prévus en matière de mobilité durable dans la région du Rhin supérieur,
- Créer une base de données, suivie d'une visualisation cartographique en collaboration avec GeoRhena.

Les travaux ont débuté au printemps 2023 par le choix d'une méthodologie appropriée pour établir un inventaire cartographique de la mobilité durable. Il a été décidé de mener une enquête auprès des collectivités territoriales de la région du Rhin supérieur.

À cette fin, TRION-climate e.V. a recensé les collectivités territoriales de la région du Rhin supérieur (EPCI, districts, villes, etc.) avec leurs interlocuteurs respectifs et a parallèlement élaboré un questionnaire destiné à ces différentes collectivités. Ce questionnaire a d'abord été testé avec les partenaires du projet Interreg CO2InnO avant d'être rendu public.

1. L'enquête était divisée en quatre parties principales :
2. Fiche d'information sur la collectivité territoriale
3. Parc automobile et bonnes pratiques
4. Politique, accessibilité et communication
5. Mobilité transfrontalière, projets actuels et futurs



Figure III-1: Extrait du questionnaire sur la mobilité durable ©TRION-climate e.V.

La zone géographique couverte par la carte de la mobilité durable correspond au territoire de compétence de la Conférence du Rhin supérieur :

- Du côté français : le territoire de la Collectivité européenne d'Alsace
- Du côté allemand : la partie occidentale du Land de Bade-Wurtemberg (les districts urbains de Fribourg et Karlsruhe ainsi que les districts ruraux de Baden-Baden, Breisgau-Hochschwarzwald, Emmendingen, Karlsruhe, Lörrach, Ortenau, Rastatt et Waldshut) et la partie sud du Land de Rhénanie-Palatinat (les districts de Germersheim, Landau, Südliche Weinstraße et Südwestpfalz)
- Du côté suisse : les cantons de Bâle-Ville, Bâle-Campagne, Jura, Soleure et Argovie

Même si la Suisse ne fait pas partie du projet CO2InnO, TRION-climate e.V. reste une association trinationale et continue de collaborer avec la France, l'Allemagne et la Suisse. C'est pourquoi l'enquête s'adresse aux trois pays.

L'enquête s'adresse aux collectivités territoriales de la région du Rhin supérieur, plus précisément : du côté français, aux EPCI (Établissements Publics de Coopération Intercommunale = CC, CA et Eurométropole), aux différents districts (Landkreis, Stadtkreis, kreisfreie Stadt) du côté allemand, aux cantons du côté suisse et enfin aux villes de plus de 20 000 habitants. Cette limite correspond à la définition d'une « ville de taille moyenne ». Entités territoriales participantes :

- 15 districts : Baden-Baden, Breisgau-Hochschwarzwald, Emmendingen, Fribourg-en-Brigau, Germersheim, Landau dans le Palatinat, district de Karlsruhe, Lörrach, district d'Ortenau, Sud-Ouest du Palatinat, Rastatt, district urbain de Karlsruhe, Route des vins du Sud, Sud-Ouest du Palatinat, Waldshut
- 22 EPCI: Saint-Louis Agglomération, CC Alsace Rhin Brisach, CC de Hanau-La Petite Pierre, CC de la Basse-Zorn, CC de la Région de Guebwiller, CC de la Vallée de Kaysersberg, CC de la Vallée de Munster, CC de la Vallée de la Doller et du Soultzbach, CC de l'Outre-Forêt, CC du Canton d'Erstein, CC du Centre du Haut-Rhin, CC du Pays de Niederbronn-les-Bains, CC du Pays de Ribeauvillé, CC du Pays de Saverne, CC du Pays Rhénan, CC du Ried de Marckolsheim, CC Sundgau, CC Sélestat, CC Sud Alsace Largue, Colmar Agglomération, Haguenau Agglomération, Mulhouse Alsace Agglomération
- 5 cantons : Argovie, Bâle-Campagne, Bâle-Ville, Jura, Soleure
- 28 villes : Aarau, Achern, Bad Krozingen, Bretten, Bruchsal, Bühl, Emmendingen, Ettlingen, Gaggenau, Germersheim, Illkirch-Graffenstaden, Kehl, Lahr, Lörrach, Mulhouse, Oberkirch, Offenburg, Rastatt, Rheinfelden, Rheinstetten, Saint-Louis,

Schiltigheim, Schopfheim, Stutensee, Waldkirch, Waldshut-Tiengen, Waghäusel,
Weil am Rhein

Plus de 80 % des collectivités territoriales interrogées ont participé à l'enquête. À l'issue de cette enquête, nous avons obtenu une série de résultats, par exemple :

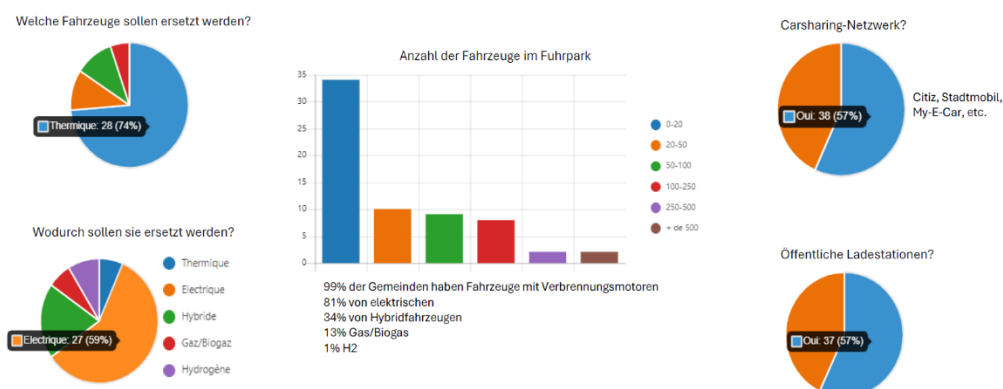


Figure III-2: Extraits des résultats de l'enquête sur la mobilité durable ©TRION-climate e.V.

Après avoir évalué les résultats de l'enquête, TRION-climate e.V. les a analysés et résumés sous forme de fiches descriptives pour chaque région. GeoRhena, le système d'information géographique pour le Rhin supérieur, a représenté toutes les informations sur une carte interactive.

Sur la carte, les zones susmentionnées sont représentées par des couleurs différentes afin d'indiquer quelles collectivités territoriales ont répondu à l'enquête et lesquelles ne l'ont pas fait. Comme il s'agit d'une carte interactive, il est possible de cliquer sur chaque zone colorée en vert pour ouvrir un fichier qui résume les réponses de la collectivité territoriale concernée à l'enquête. La carte offre ainsi un profil de réponse clairement résumé pour chaque unité territoriale interrogée, accessible en un seul clic.

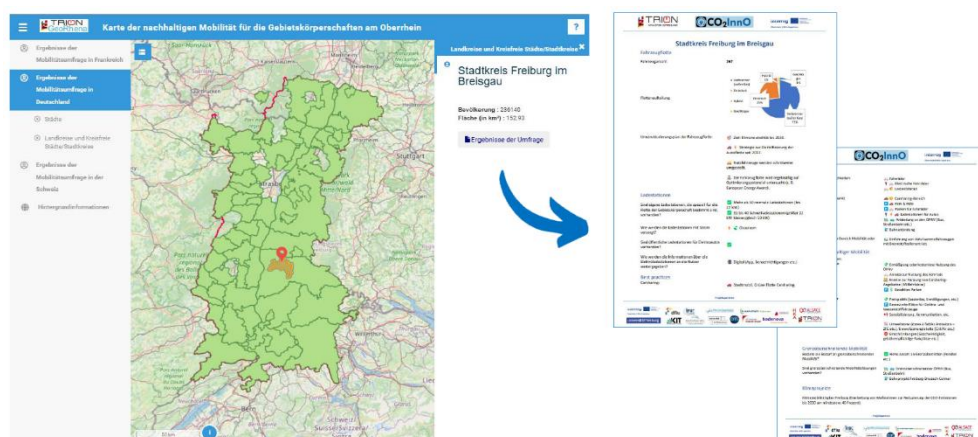


Figure III-3: : Extrait de la carte sur la mobilité durable des collectivités territoriales dans la région du Rhin supérieur ©TRION-climate e.V.

Au final, le travail réalisé dans le cadre de notre projet Interreg nous a permis d'identifier les bonnes pratiques, mais surtout de dresser un état des lieux de la mobilité durable dans la région du Rhin supérieur.

La prochaine étape importante serait d'obtenir les réponses de toutes les collectivités territoriales interrogées.

En outre, la carte pourrait être développée davantage sur le plan thématique, par exemple en se spécialisant dans les flottes de véhicules publics. Cela permettrait de se concentrer sur un seul thème à la fois et pourrait ainsi toucher un autre public cible.

III.2. Mobilité électrique durable et son lien avec la cogénération

Contexte

III.2.1. Dans le domaine de la mobilité, le potentiel de réduction des émissions de CO₂ est également abordé. Dans les trois pays voisins du Rhin supérieur, entre un quart et un tiers des émissions totales proviennent du secteur des transports. Au sein de ce secteur, le trafic routier représente toujours plus de 95 % des émissions (Agence fédérale allemande pour l'environnement, 2024 ; OFEV, 2025 ; Commissariat général au développement durable, 2021). Au vu de ces chiffres, il est logique de poursuivre la décarbonisation des transports. La mobilité est essentielle dans la région du Rhin supérieur, qui est densément interconnectée, mais le trafic routier représente également un facteur d'émission considérable. Les transports publics jouent un rôle important, mais ils ne peuvent pas remplacer le transport individuel. Dans l'étude présentée, le transport individuel est donc examiné comme un élément important de la mobilité, y compris à l'avenir. Pour une transition vers la mobilité électrique, le raccordement des infrastructures de recharge pour véhicules électriques aux systèmes de cogénération présente également un intérêt. L'objectif du projet est donc d'analyser les structures existantes en matière de mobilité électrique dans le secteur automobile, de dresser un état des lieux et, sur cette base, de développer des objectifs régionaux. L'utilisation toujours dominante des combustibles fossiles dans le transport individuel entraîne l'émission de grandes quantités de CO₂. Dans le contexte de l'objectif politique de neutralité climatique, il est donc nécessaire de passer rapidement à des solutions de mobilité à faibles émissions voire neutres en termes de gaz à effet de serre dans le transport de personnes. L'électrification du transport individuel grâce à des véhicules électriques à batterie (BEV) offre actuellement le plus grand potentiel de réduction rapide des émissions de CO₂, car elle est considérée comme la forme de mobilité la plus efficace sur le plan énergétique.

Une approche innovante et économiquement intéressante qui s'ouvre dans ce contexte est la réinjection d'électricité provenant des batteries des véhicules dans le réseau (Vehicle-to-Grid, V2G). Combinée aux technologies de compteur intelligent, elle permet un stockage d'énergie utile au réseau qui contribue à stabiliser et à flexibiliser le système électrique. Cette interface

technologique ouvre de nouvelles possibilités pour envisager les installations de cogénération et la mobilité électrique comme des systèmes énergétiques intégrés.

Afin de pouvoir évaluer de manière réaliste les potentiels régionaux, il est tout d'abord nécessaire de procéder à une analyse complète de la situation actuelle et des développements prospectifs. Les analyses nationales réalisées jusqu'à présent sur la mobilité électrique ne sont souvent pas transfrontalières. Il manque manifestement une analyse différenciée de la situation dans la région du Rhin supérieur, au-delà de l'Allemagne, de la France et de la Suisse.

Les questions particulièrement pertinentes à cet égard sont le nombre de véhicules électriques actuellement immatriculés dans la région, la part de l'infrastructure de recharge en tant que moteur de la mobilité électrique et sa répartition entre les sites publics, commerciaux et privés. Actuellement, le taux d'électrification dans la région du Rhin supérieur est en moyenne inférieur à 5 % dans les trois pays [cf. KBA, 2024 ; Ministère de la Transition écologique, 2024 ; BfS, 2024]. Le nombre de véhicules immatriculés augmente continuellement, mais la grande majorité d'entre eux sont encore équipés de moteurs à combustion.

Le transport individuel motorisé devrait être le moins polluant possible, ce qui peut être réalisé notamment grâce à l'électrification progressive des voitures particulières et des véhicules utilitaires légers.

Les nouvelles technologies telles que l'électromobilité se heurtent à un problème structurel, à savoir *le dilemme de l'œuf et de la poule* : la demande et les infrastructures sont interdépendantes. Cependant, il existe désormais un large consensus sur la nécessité de développer d'abord une infrastructure de recharge complète afin de stimuler la demande de véhicules électriques^{4, 5}.

L'Allemagne, la France et la Suisse suivent ce principe, mais leurs approches méthodologiques et leurs objectifs diffèrent considérablement. Alors que l'Allemagne et la France, en tant que membres de l'UE, sont soumises au règlement (UE) 2023/1804 relatif au déploiement d'une infrastructure pour les carburants alternatifs (AFIR), la Suisse, qui n'est pas membre de l'UE, n'y est pas formellement liée. Dans les faits, elle s'aligne toutefois souvent sur les exigences de l'UE et est partiellement intégrée à celle-ci par le biais d'accords bilatéraux.

Les objectifs nationaux en matière d'électrification des transports et d'infrastructure de recharge sont documentés dans les rapports d'inventaire nationaux (NIR) et les cadres politiques nationaux (NPF) respectifs. En Allemagne, le NPF actuel⁶ prévoit la mise en place

⁴ https://www.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/mlr/intern/dateien/PDFs/L%C3%A4ndlicher_Raum/2018_05_04_Studie_LIS_MLR.pdf

⁵ <https://vm.baden-wuerttemberg.de/de/politik-zukunft/elektromobilitaet/ladeinfrastruktur>

⁶ [https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/system/files/documents/2022-12/Germany%20NPF%20\(EN\)_0.pdf](https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/system/files/documents/2022-12/Germany%20NPF%20(EN)_0.pdf)

d'un million de points de recharge d'ici 2030. Le gouvernement fédéral s'est fixé pour objectif 15 millions⁷,⁸ de véhicules électriques. La France⁹ prévoit 4,5 millions de BEV¹⁰ et 2,1 millions de PHEV ainsi que 400 000 points de recharge publics¹¹ d'ici 2030.

Les objectifs ont été révisés à plusieurs reprises ces dernières années. En Allemagne, l'objectif de 15 millions de véhicules électriques d'ici 2030 n'a été revu à la hausse que dans l'accord de coalition du gouvernement « feu tricolore ». Les projections de la France varient également considérablement, par exemple entre les chiffres officiels de *la Programmation pluriannuelle de l'énergie* (PPE) et les estimations du gestionnaire de réseau de transport RTE, qui prévoit jusqu'à 15,6 millions de véhicules électriques d'ici 2035. Il est donc difficile d'établir des prévisions fiables et uniformes à l'échelle transfrontalière concernant le développement de la mobilité électrique dans la région du Rhin supérieur.

Au regard des objectifs fixés, les questions centrales suivantes se posent pour le sous-projet du WP3 :

1. **Quelle est la puissance de recharge actuellement installée pour les véhicules électriques dans le Rhin supérieur et comment est-elle répartie sur le territoire ?**
2. **Quelle est la puissance de recharge nécessaire dans le Rhin supérieur pour répondre aux exigences réglementaires et aux objectifs de l'UE dans le cadre du paquet « Fit for 55 » et comment celle-ci est-elle répartie dans l'espace public ?**
3. **Dans quelle mesure les exigences de l'AFIR sont-elles respectées et où subsistent des lacunes ?**
4. **Comment cette puissance de recharge est-elle répartie géographiquement entre le secteur privé et le secteur commercial selon les pays ?**
5. **Comment l'utilisation évolue-t-elle selon des scénarios présentant différentes proportions de voitures électriques dans la région ?**
6. **Quel est le potentiel d'intégration d'une infrastructure de recharge avec fonction de réinjection (V2G) dans les installations de cogénération ?**

⁷<https://dserver.bundestag.de/btd/20/105/2010591.pdf>

⁸<https://www.bcg.com/press/31july2024-15-millionen-e-autos-bis-2030-politisches-zogern-und-zolle-fur-importe-aus-china-rucken-ziel-in-weite-ferne>

⁹https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2023/12/NOW_E-Mobilitaet-international_Dossier-Frankreich.pdf

¹⁰ https://www.avere-france.org/wp-content/uploads/2023/09/AVERE_Hit_the_Road_TOME_2.pdf

¹¹<https://presse.economie.gouv.fr/dp-le-gouvernement-fixe-le-cap-de-7-millions-de-bornes-de-recharge-pour-vehicules-electriques-en-2030/#~:text=DP%20%2D%20Le%20Gouvernement%20fixe%20le%20cap,de%20recharge%20pour%20v%C3%A9hicules%20%C3%A9lectriques%20en%202030>

III.3. Analyses réalisées

Afin de répondre aux questions de recherche formulées plus haut, différentes analyses empiriques et spatiales ont été réalisées. Basées sur des sources de données publiques et spécifiques à la région, celles-ci doivent permettre une évaluation aussi complète que possible de l'infrastructure de recharge pour véhicules électriques dans le Rhin supérieur. En raison de la disponibilité hétérogène des données entre l'Allemagne, la France et la Suisse, il n'a pas été possible de réaliser toutes les analyses de manière exhaustive. Certaines analyses ne fournissent donc des résultats fiables que pour certaines régions nationales spécifiques.

Un élément méthodologique central est la **cartographie** et **l'analyse** des points de recharge à l'aide d'un **système d'information géographique (QGIS)**. Cela permet non seulement une évaluation différenciée dans l'espace, mais aussi l'identification des densités d'approvisionnement, des lacunes en matière d'infrastructure et des modèles régionaux. Malgré les différences administratives et réglementaires entre les trois pays, des structures et des tendances générales ont pu être identifiées, ce qui permet une généralisation partielle des résultats pour l'ensemble de la région.

Les étapes d'analyse suivantes ont été réalisées :

1. **Inventaire de l'infrastructure de recharge dans le Rhin supérieur**

Un inventaire détaillé et géolocalisé des points de recharge a été établi à partir de bases de données publiques (par exemple Open Charge Map, registre des bornes de recharge de l'Agence fédérale des réseaux, GIREVE pour la France, evmap.ch pour la Suisse). Cet inventaire sert de base à toutes les analyses suivantes.

2. **Analyse du respect des exigences réglementaires (AFIR & RTE-T)**

Les points de recharge ont été analysés au regard des exigences du *règlement européen sur les infrastructures pour les carburants alternatifs* (AFIR, règlement (UE) 2023/1804) et des spécifications RTE-T (réseaux transeuropéens de transport) (règlement (UE) n° 1315/2013), notamment en ce qui concerne les distances minimales requises et la puissance de recharge le long des corridors RTE-T (cf. Commission européenne, 2023).

3. **Analyse de l'utilisation des points de recharge publics au moment de l'enregistrement et dans différents scénarios de mobilité électrique**

Des scénarios avec une part de 50 % ou 100 % de véhicules électriques à batterie dans le transport individuel motorisé ont été modélisés. Sur la base de comportements de recharge empiriques (par exemple à partir des protocoles de recharge des opérateurs, d'études chronologiques ou de simulations – cf. Plötz et al., 2020 ; Agora Verkehrswende, 2021), il a été estimé quel serait le taux d'utilisation de l'infrastructure de recharge existante dans ces conditions et si des goulots d'étranglement étaient à prévoir. Ces conclusions sont particulièrement

pertinentes pour une éventuelle connexion à des installations de cogénération.

4. Comparaison avec le réseau de stations-service existant

Afin d'améliorer la facilité d'utilisation et l'acceptation des nouvelles infrastructures de recharge, une analyse a été réalisée pour déterminer dans quelle mesure la répartition des points de recharge correspond à celle des stations-service conventionnelles. Cette analyse se base sur la cartographie des stations-service à partir de données open source (OpenStreetMap, 2024).

5. Estimation de la disponibilité des infrastructures de recharge privées

En l'absence de base de données cohérente pour les points de recharge privés, leur disponibilité et leur performance ont été estimées à titre d'exemple dans le cadre d'études de cas. Les données utilisées sont issues des rapports énergétiques communaux des fournisseurs. Les résultats permettent de dégager une tendance concernant le rapport entre les points de recharge privés et publics dans différentes structures d'habitat (cf. ifeu, 2022).

6. Analyse bibliographique sur l'intégration du Vehicle-to-Grid (V2G) dans les systèmes de cogénération

Sur la base d'études internationales, nous avons examiné les conditions techniques et réglementaires dans lesquelles l'intégration des fonctionnalités V2G dans les structures de cogénération semble judicieuse (cf. EPEX SPOT, 2023 ; AIE, 2022 ; FfE, 2020). Nous nous sommes particulièrement intéressés aux aspects de la stabilité du réseau, du transfert de charge et de la flexibilité saisonnière .

Les sources de données concrètes, les méthodes QGIS et les résultats d'évaluation pour chaque point d'analyse sont décrits en détail dans les sections suivantes.

L'analyse de l'électromobilité dans le Rhin supérieur repose sur la saisie, la structuration et l'évaluation détaillées de l'infrastructure de recharge pour les véhicules électriques. Les études se sont concentrées sur la question de savoir si l'infrastructure actuellement installée répond aux exigences, comment elle est utilisée et quelles lacunes sont à prévoir à l'avenir. Une attention particulière a également été accordée à la répartition entre les infrastructures de recharge publiques et privées, ainsi qu'aux emplacements stratégiquement importants tels que les stations-service ou les nœuds RTE-T.

Cartographie des points de recharge publics

III.3.1.1. Approche méthodologique de l'analyse

Le point de départ de l'analyse est la création d'une carte QGIS qui représente la répartition géographique de tous les points de recharge publics dans la région du Rhin supérieur. Le terme « points de recharge » a été délibérément préféré à celui de « stations de recharge »,

puisque une station de recharge peut généralement disposer de plusieurs points de recharge (c'est-à-dire de connexions individuelles), ce qui entraînerait des erreurs d'interprétation. Une analyse au niveau des points de recharge permet donc une étude plus précise de l'infrastructure réellement disponible. Dans ce qui suit, le terme « point de recharge » est utilisé pour désigner les connexions de recharge individuelles. Lorsque plusieurs points de recharge sont regroupés sur un site ou dans une installation, le terme « station de recharge » est également utilisé dans le texte.

La carte est basée sur les registres nationaux des trois pays concernés :

- Allemagne : Agence fédérale des réseaux (BNetzA)¹²
- France : Ministère de l'aménagement du territoire et de la décentralisation¹³
- Suisse : Office fédéral de l'énergie (OFEN)¹⁴

Outre de nombreuses autres informations, ces registres contiennent des informations géoréférencées sur l'emplacement, la puissance, l'exploitant et le type de connexion de l'installation de recharge. Malgré des différences nationales considérables dans la structure des données, une harmonisation minutieuse a permis d'établir la comparabilité des données. L'ajustement le plus important a été de faire en sorte que chaque ligne d'un ensemble de données contienne exactement un point de recharge avec la puissance de recharge correcte correspondante. Cela a été réalisé grâce à la programmation de scripts spécialement conçus à cet effet.

Pour la représentation cartographique, le Rhin supérieur a été divisé en deux niveaux d'analyse : les sous-régions nationales et les unités administratives locales. Les unités administratives locales comprennent 14 villes et districts en Allemagne, 41 établissements publics de coopération intercommunale (EPCI ou intercommunalités) en France et 5 cantons en Suisse, dont certaines unités sont également divisées en sous-régions. Les 60 unités administratives permettent une analyse granulaire, en particulier du côté français, où les intercommunalités choisies offrent une meilleure comparabilité que les départements. En complément, les données de population et d'immatriculation ont été intégrées afin de calculer des indicateurs tels que le nombre de points de recharge pour 1 000 habitants ou pour voiture électrique.

La carte QGIS disponible à la Figure III-4 répertorie tous les points de recharge et stations-service à hydrogène (en bleu clair) situés dans le Rhin supérieur (dernière mise à jour en

¹² <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/E-Mobilitaet/start.html> (Données au 21/03/2024)

¹³ <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/fichier-consolide-des-bornes-de-recharge-pour-vehicules-electriques/> (Données : 20/03/2024)

¹⁴ <https://opendata.swiss/de/dataset/ladestationen-fuer-elektroautos> (état des données : 25/03/2024)

2024). Les données ne correspondent pas entièrement à celles de l'Open Charge Map (OCM), c'est pourquoi il a été décidé de ne pas fusionner les deux sources de données.

Les points de recharge sont représentés par des couleurs différentes en fonction de leur puissance de recharge. **Les points de recharge normaux** (jusqu'à 22 kW) sont représentés en jaune, **les points de recharge rapide** (de 22 kW à 50 kW) en orange et **les points de recharge haute puissance** (de 50 kW à 350 kW et plus) en rouge.

La classification des points de recharge normaux et rapides repose sur les définitions de la directive européenne 2014/94/UE relative au déploiement d'une infrastructure pour les carburants alternatifs. L'article 2, points 4 et 5, stipule :

4. « *Point de recharge normal* » : un point de recharge permettant de transférer de l'électricité à un véhicule électrique avec une puissance de recharge maximale de 22 kW, à l'exception des dispositifs d'une puissance de recharge maximale de 3,7 kW installés dans des logements privés ou dont l'objectif principal n'est pas la recharge de véhicules électriques et qui ne sont pas accessibles au public.

5. Une « *borne de recharge rapide* » est une borne de recharge permettant de transférer de l'électricité à un véhicule électrique avec une puissance de recharge supérieure à 22 kW.

Ces termes ne sont pas utilisés de manière uniforme dans la littérature. EnBW (Energie Baden-Württemberg AG), par exemple, ne parle de station de recharge rapide qu'à partir d'une puissance de 50 kW, contrairement à la définition de la directive européenne. Plus de 10 ans se sont écoulés depuis la définition des termes dans la directive européenne susmentionnée. Entre-temps, la puissance de charge est considérablement plus élevée dans de nombreux endroits, de sorte qu'il apparaît judicieux d'introduire une nouvelle catégorie désignant les stations de recharge dont la puissance de charge est nettement supérieure à 22 kW. Les stations de recharge à haute puissance sont celles qui peuvent fournir plus de 50 kW, jusqu'à 350 kW et plus pour un cycle de recharge.

III.3.1.2. Résultats de l'évaluation des stations de recharge

Les zones urbaines, en particulier à Strasbourg, Karlsruhe, Bâle et Fribourg et leurs environs, présentent une forte densité de stations de recharge, qui est également particulièrement élevée dans le canton suisse d'Argovie. Au total, en mars 2024, 4180 points de recharge étaient enregistrés auprès de la BNetzA dans la région allemande du Rhin supérieur, 2136 points de recharge dans la région française et 2267 points de recharge dans les cinq cantons suisses auprès des organisations correspondantes (voir Figure III-4). La puissance de recharge totale installée au niveau national dans la région du Rhin supérieur est de 175 434 kW pour l'Allemagne, de 113 680 kW pour la France et de 85 812 kW pour la Suisse.

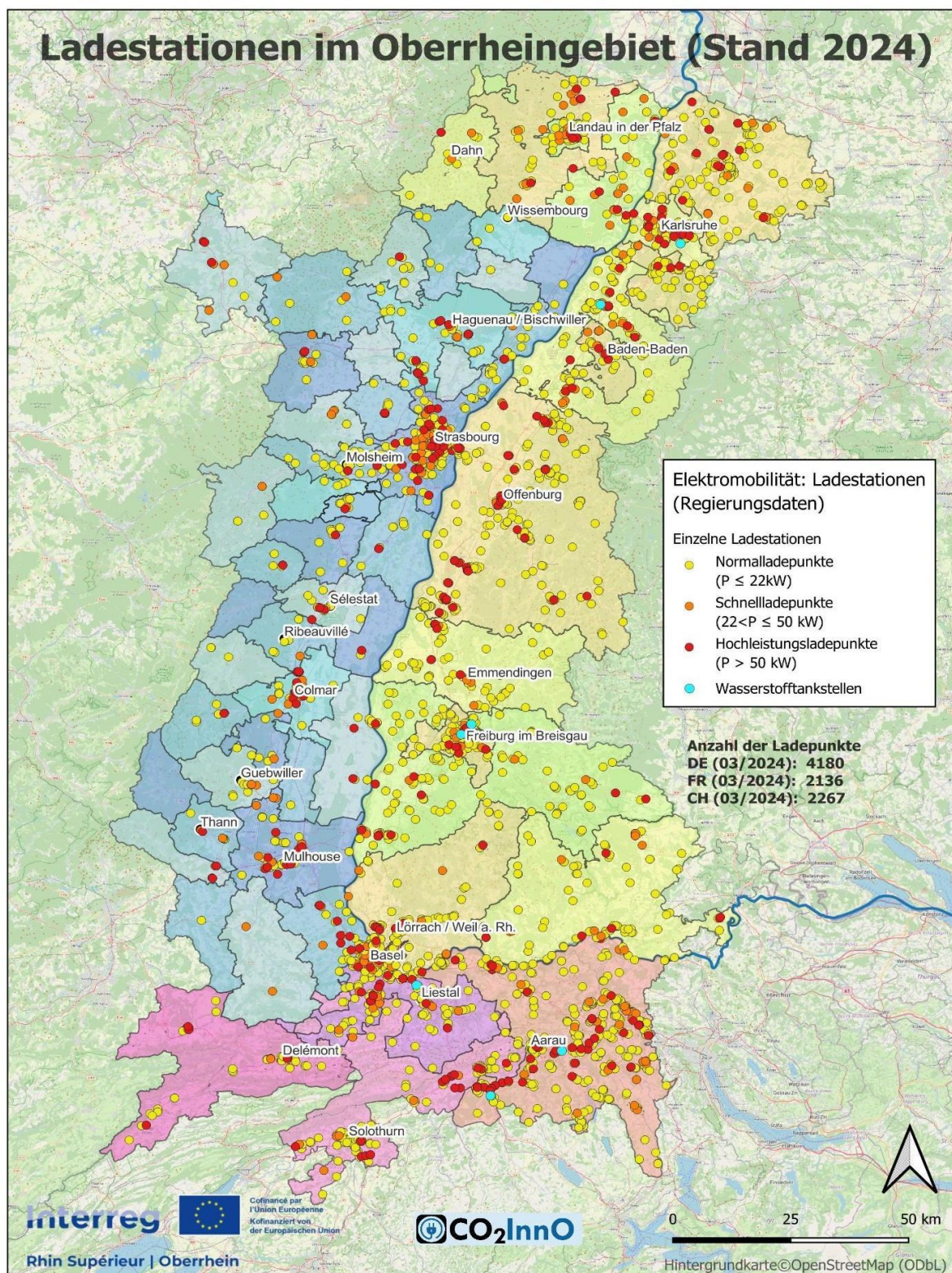


Figure III-4: QGIS carte des points de recharge dans les 60 unités administratives du Rhin supérieur en 2024

Dans Figure III-5 la puissance de recharge régionale et l'infrastructure de recharge régionale sont présentées de manière synthétique. Dans la carte, la hauteur de chaque colonne correspond à la puissance de charge totale disponible dans une région. La partie jaune des diagrammes correspond à la puissance de charge disponible à partir des points de charge

normaux, la partie orange à celle des points de charge rapide et la partie rouge à celle des points de charge haute performance. La région d'Argovie et l'Ortenaukreis affichent les puissances de charge les plus élevées, ce qui se reflète dans les colonnes hautes par rapport aux autres régions. Cela s'explique notamment par le fait que ces régions sont les plus étendues en termes de superficie. Il est également frappant de constater que la puissance de charge totale disponible dans la partie orientale du Rhin supérieur est nettement supérieure à celle de la partie occidentale. Toutefois, si l'on tient compte de la densité de population, le tableau est plus équilibré.

Il est intéressant de constater que certaines EPCI ne disposent que d'une faible puissance de recharge. Pour certaines EPCI, telles que la CC du Pays de la Zorn, la CC du Val d'Argent, la CC de la Vallée de Saint-Amarin et la CC de la Basse-Zorn, les données gouvernementales ne mentionnent même aucune station de recharge. De plus, l'infrastructure de recharge reste peu développée dans d'autres intercommunalités. Néanmoins, les données d'immatriculation des véhicules pour ces zones montrent que des véhicules électriques à batterie (BEV) y sont également utilisés. On peut donc supposer que la plupart des recharges dans ces régions ont lieu principalement à domicile ou sur le lieu de travail.

Il existe désormais un large consensus sur la nécessité de disposer d'une infrastructure appropriée avant qu'une demande significative en matière de bornes de recharge publiques ne se développe [1]. Cependant, en raison des coûts d'investissement élevés et du nombre relativement faible de véhicules électriques dans les zones rurales, un développement complet de l'infrastructure n'est souvent pas encore rentable. Cela conduit à un dilemme : d'une part, l'acceptation de la mobilité électrique reste limitée, en particulier dans les zones rurales (International Council on Clean Transportation - ICCT, 2021 ; Direction interministérielle de la transformation publique, 2025) [2], ce qui explique la faible proportion de véhicules électriques dans ces zones ; d'autre part, le faible nombre de véhicules empêche un développement économiquement rentable de l'infrastructure de recharge. Ce dilemme ne se limite pas exclusivement à la France, mais il se manifeste de manière particulièrement évidente dans les EPCI rurales du Rhin supérieur et peut également être observé dans d'autres sous-régions rurales de la zone étudiée. Pour toutes les zones concernées, il est nécessaire : soit de promouvoir de manière ciblée l'acceptation des véhicules électriques, soit de développer de manière cohérente les infrastructures. Ces deux facteurs étant étroitement liés, il convient de

choisir une approche stratégique appropriée afin de promouvoir efficacement l'électrification des flottes de véhicules et des infrastructures de recharge.

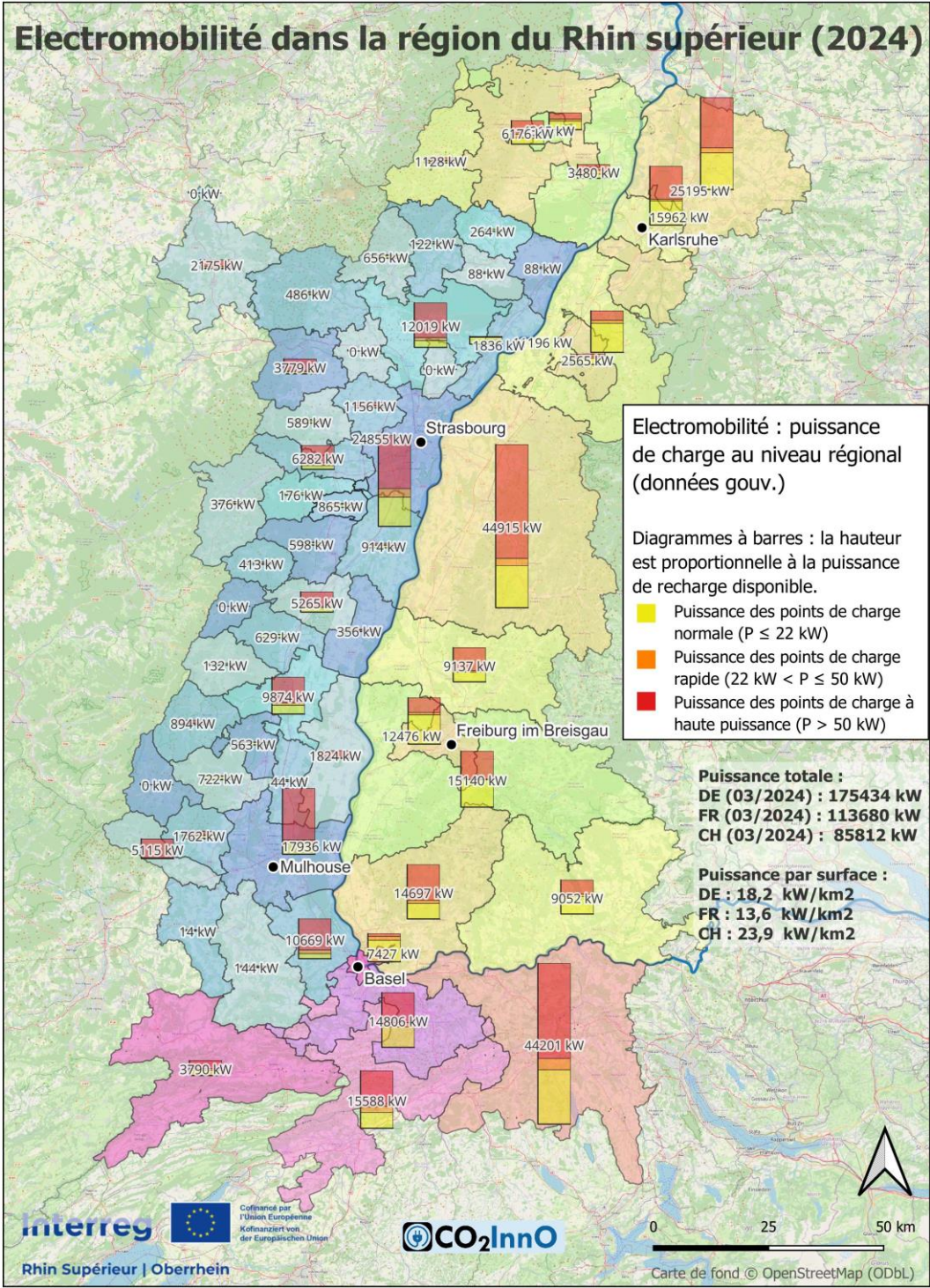


Figure III-5: Électromobilité dans le Rhin supérieur : carte générale de la puissance de recharge en 2024

La répartition géographique des infrastructures de recharge dans le Rhin supérieur varie fortement entre les trois régions transfrontalières et est globalement très hétérogène. Comme le montre Figure III-4, on observe des modèles de répartition différents des points de recharge en Allemagne, en France et en Suisse. En raison des spécificités propres à chaque pays, les définitions des zones urbaines et rurales diffèrent également. Il n'existe certes pas de définition européenne uniforme des grandes villes, mais on considère généralement comme telles les villes de plus de 100 000 habitants. À des fins de comparabilité, un seuil de 20 000 habitants a été fixé pour les villes moyennes et de 5 000 habitants pour les petites villes ; les zones en dessous de ces seuils ne sont plus considérées comme des villes.

Le tableau III.1 ci-dessous montre les différences nationales dans la répartition des points de recharge entre les zones rurales (« hors ville ») et les grandes villes (à partir de 100 000 habitants) du Rhin supérieur.

Tableau III-1: Répartition en pourcentage des points de recharge selon la densité de population dans le Rhin supérieur

	FR	CH	DE	Rhin supérieur
Pas de ville	36,5%	32,4%	16,1%	25,4%
Petite ville	31,8%	49,2%	29,9%	35,5%
Ville moyenne	16,6%	5,5%	33,7%	22,0%
Grande ville	15,1%	12,9%	20,3%	17,1%

Alors qu'en France et en Suisse, par exemple, plus de 30 % des points de recharge se trouvent dans les zones rurales, ce chiffre n'est que d'environ 16 % en Allemagne. La répartition inégale des points de recharge ne s'explique que partiellement par les différences démographiques. Il apparaît clairement que le développement de l'infrastructure de recharge ne suit pas directement la densité de population, ce qui indique l'existence d'autres facteurs d'influence. Les différences significatives entre la France, la Suisse et l'Allemagne indiquent qu'outre le nombre d'habitants, ce sont surtout les conditions-cadres spécifiques à chaque pays et les particularités régionales qui déterminent de manière décisive le développement.

Répartition régionale des infrastructures de recharge privées et publiques

Outre l'infrastructure publique, l'infrastructure de recharge privée a été examinée à travers deux études de cas pour lesquelles des sources de données étaient disponibles : un ensemble de données a été fourni par OBELIS¹⁵, une plateforme en ligne permettant de signaler toutes les stations de recharge subventionnées par le programme fédéral d'aide à l'infrastructure de

¹⁵ OBELIS : rapport en ligne sur l'infrastructure de recharge

recharge, à partir de sa base de données, tandis que d'autres ensembles de données ont été obtenus auprès des gestionnaires de réseaux de distribution locaux (GRD). En raison de taux de déclaration incomplets, il faut toutefois partir du principe que les ensembles de données comportent un nombre élevé de cas non recensés, mais il est tout à fait possible d'en déduire une tendance qui présente un intérêt pour la planification future. Les études couvrent la ville de Fribourg-en-Brigau pour la zone urbaine et le district de Brigau-Haute Forêt-Noire pour la zone rurale.

La puissance de charge totale installée à partir des ensembles de données disponibles pour les zones mentionnées est résumée dans le Tableau III-2 pour les infrastructures de recharge privées et publiques. Les données relatives aux infrastructures de recharge publiques proviennent de l'Agence fédérale des réseaux (BNetzA). Les valeurs issues des deux ensembles de données pour les stations de recharge privées ont été fournies par les fournisseurs VBN et OBELIS pour les zones comparables. Hormis le nombre inconnu de stations de recharge privées, les ensembles de données semblent permettre des estimations fiables entre les zones rurales et urbaines. On constate que la puissance de recharge installée en valeur absolue est globalement plus importante dans l'espace privé que dans l'espace public, et même considérablement plus importante dans les zones rurales.

Tableau III-2: Puissance de recharge privée et publique : comparaison des données

	Prestation infrastructure de recharge privée		Performance de l'infrastructure publique de recharge
	VNB	OBELIS	BNetzA
District urbain Freiburg i. Br.	16.937 kW	23.960 kW	12.476 kW
comté Breisgau-Hochschwarzwald	54.705 kW	66.600 kW	15.140 kW

Le nombre respectif de points de recharge est indiqué dans le Tableau III-3 . En zone urbaine, le nombre de points de recharge privés est environ deux fois plus élevé que le nombre de points de recharge publics. Dans les zones rurales, en revanche, il y a beaucoup plus de points de recharge privés, le facteur étant d'environ 10 si l'on tient compte des chiffres non officiels. L'analyse a montré que la puissance moyenne des points de recharge privés (environ 12 kW) est, comme prévu, nettement inférieure à celle des points de recharge publics (environ 44 kW).

Tableau III-3: Nombre de bornes de recharge privées et publiques : comparaison des données

	Prestation infrastructure de recharge privée		Performance de l'infrastructure publique de recharge
	VNB	OBELIS	BNetzA
District urbain Freiburg i. Br.	745	1198	425
comté Breisgau-Hochschwarzwald	2676	3330	400

Exigences AFIR et infrastructure de recharge le long du réseau RTE-T

Le règlement AFIR de l'UE constitue un ensemble de règles qui sont centrales pour le projet.

En tant que droit européen directement applicable, il fixe des exigences contraignantes pour la mise à disposition d'infrastructures de recharge, y compris le long des principaux axes de transport, et pour la puissance des bornes de recharge. La catégorie des voitures particulières et des véhicules utilitaires légers est particulièrement pertinente pour le projet CO2InnO. Les analyses suivantes du projet font explicitement référence au règlement AFIR, mais vont au-delà afin de couvrir de manière aussi exhaustive que possible la situation actuelle et les possibilités de développement.

La spécification AFIR relative à la puissance de recharge installée accessible au public nécessaire pour se conformer au règlement est basée sur le nombre existant de véhicules électriques à batterie (BEV) et hybrides rechargeables (PHEV) immatriculés. Les données relatives aux véhicules ont été obtenues auprès des autorités compétentes.

- Allemagne : Office fédéral des transports motorisés (KBA), statistiques sur les voitures particulières par type de motorisation ¹⁶
- France : Ministère de l'Intérieur ¹⁷ .
- Suisse : Office fédéral de la statistique (OFS)¹⁸ .

L'analyse a montré que le règlement AFIR est actuellement respecté dans les trois pays du Rhin supérieur. Les chiffres exacts sont présentés dans le Tableau III-4.

¹⁶ https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz27_b_uebersicht.html

¹⁷ <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/voitures-particulieres-immatriculees-par-commune-et-par-type-de-recharge-jeu-de-donnees-aaadata/>

¹⁸ https://www.pxweb.bfs.admin.ch/pxweb/de/px-x-1103020100_106/

Tableau III-4: Puissance de recharge publique : exigences AFIR et puissance de recharge effectivement installée VEB : véhicule électrique à batterie ; VHR : véhicule hybride rechargeable ;

	Nombre de VEB	Nombre de VHR	Spécification AFIR	Puissance de charge installée
Allemagne	51.062	28.556	89.225 kW	175.434 kW
France	20.883	12.902	37.470 kW	113.680 kW
Suisse	25.893	12.895	43.977 kW	85.812 kW

Afin de visualiser et d'aider à évaluer si la répartition actuelle des points de recharge est déjà optimale et si la puissance de recharge installée est adaptée à la demande, une grille rectangulaire de 5 000 m de côté a été superposée à la carte du Rhin supérieur à des fins d'analyse.

Une clé de répartition possible pour les besoins en puissance de charge est l'urbanisation. On part ici du principe que plus la surface urbanisée est grande, plus les besoins en puissance de charge augmentent. L'influence de la hauteur des bâtiments et le fait qu'il s'agisse ou non de zones industrielles ne sont pas pris en compte.

L'Agence spatiale européenne (ESA) propose avec ESA WorldCover 2021¹⁹ une carte mondiale de la couverture terrestre qui comprend également les zones bâties. Les données sont fournies avec une résolution de 10 m²⁰. Ces données permettent de déterminer la proportion de surface bâtie à l'intérieur d'un polygone de la grille, qui peut alors servir de mesure des besoins en puissance de charge.

La puissance de charge installée au niveau régional (voir Figure III-5) a désormais été transférée proportionnellement aux cellules de la grille, y compris aux cellules de la grille proportionnelles. De manière analogue, la puissance de charge requise par l'AFIR a été répartie entre les éléments de la grille à l'aide de la clé de répartition « Construction ». Les données relatives à la puissance de charge installée et à la puissance de charge exigée par l'UE sont comparées et représentées avec une résolution spatiale sur la carte QGIS disponible à la Figure III-6. Concrètement, la carte calcule la différence entre la puissance de charge installée et l'exigence AFIR pour chaque élément de la grille et affiche le résultat en couleur.

Bien que le règlement AFIR soit globalement respecté dans les trois pays du Rhin supérieur, un examen plus détaillé révèle qu'il existe des régions où la puissance de charge publique disponible ne répondrait pas aux exigences de l'AFIR (éléments rouges de la grille). Ces régions se trouvent presque exclusivement à l'ouest du Rhin, principalement sur le territoire français, mais aussi sur le territoire allemand. La région française du Rhin supérieur comprend principalement des régions peu peuplées avec des infrastructures moins développées, où les

¹⁹ <https://esa-worldcover.org/en/data-access>

²⁰ https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/ESA_WorldCover_v200?hl=de

exigences de l'AFIR seraient moins souvent respectées au niveau local. Cependant, dans les agglomérations de Strasbourg, Mulhouse ou Colmar, les exigences de l'AFIR sont parfois largement dépassées. En Suisse, selon cette analyse maillée, il n'y a pas de régions où l'exigence de l'AFIR n'est pas atteinte. En résumé, on peut constater que l'exigence de performance de l'AFIR est clairement remplie dans la plupart des unités maillées (éléments jaunes et verts).

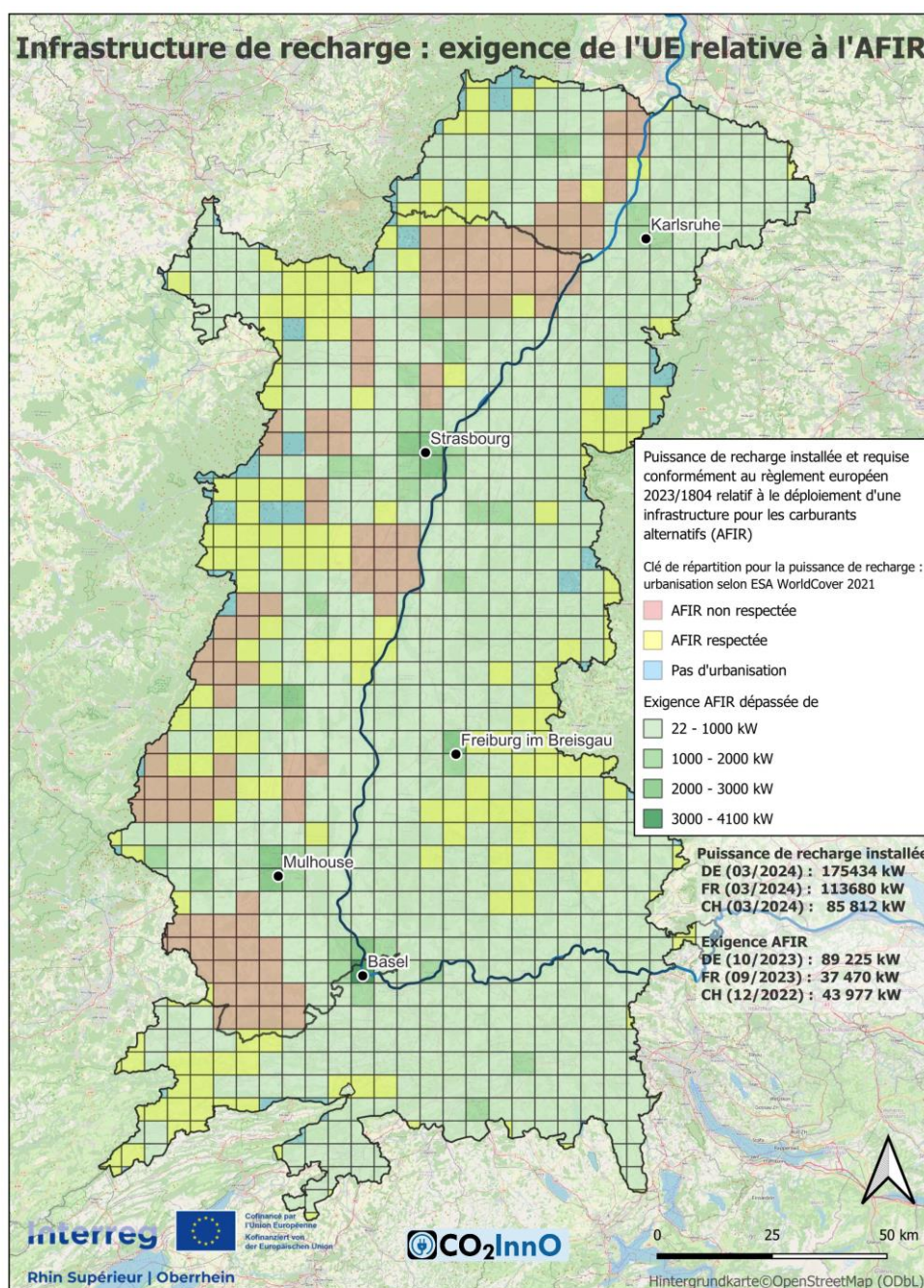


Figure III-6: Carte générale de la puissance de recharge selon le règlement européen AFIR

La connexion de l'infrastructure de recharge au corridor RTE-T de l'UE est un élément central de la planification européenne de la mobilité. Le règlement AFIR stipule qu'une puissance de

recharge publique d'au moins 1,3 kW par véhicule électrique à batterie (BEV) et de 0,8 kW par véhicule hybride rechargeable (PHEV) doit être disponible. Bien que cette réglementation s'applique au niveau national, elle a également été mise en œuvre au niveau des districts et des EPCI pour l'évaluation, en plus de l'analyse de réseau. La comparaison de la puissance de recharge existante avec les spécifications AFIR révèle des différences considérables au sein du Rhin supérieur. Alors que certaines zones urbaines dépassent déjà les valeurs cibles, il existe des lacunes importantes, en particulier dans les régions rurales.

L'infrastructure de recharge le long des principaux axes de transport transeuropéens, pour lesquels le règlement européen définit également des objectifs d'expansion spécifiques et obligatoires, nécessite un examen séparé et plus détaillé.

Analyse de l'infrastructure de recharge le long du réseau RTE-T

III.3.4.1. Contexte réglementaire et méthodologie

III.3.4.

Cette analyse se concentre sur l'état de l'infrastructure de recharge pour les véhicules électriques le long du réseau central du réseau transeuropéen de transport (RTE-T) dans le Rhin supérieur. Elle évalue la disponibilité, les performances et l'accessibilité des stations de recharge en Allemagne, en France et en Suisse, et vérifie leur conformité avec le **règlement (UE) 2023/1804 (AFIR)**.

Ce règlement européen fixe des objectifs clairs pour le développement des infrastructures pour les carburants alternatifs. Il stipule que d'ici le **31 décembre 2025**, des bornes de recharge accessibles au public pour les voitures particulières et les véhicules utilitaires légers doivent être disponibles dans chaque sens de circulation au moins tous **les 60 kilomètres** le long du réseau central du RTE-T. En outre, chacune de ces bornes de recharge doit fournir une puissance totale d'au moins **400 kW** et comprendre au moins un point de recharge d'une puissance individuelle de **150 kW** ou plus. Le règlement prévoit également que les stations de recharge doivent être situées soit directement sur l'autoroute RTE-T, soit à moins de **3 kilomètres** de la sortie la plus proche, afin de garantir leur accessibilité aux conducteurs de véhicules électriques.

Pour réaliser cette évaluation, le réseau routier RTE-T dans la région du Rhin supérieur a d'abord été numérisé à l'aide du visualiseur de cartes TEN-Tec et des données OpenStreetMap (OSM) dans un environnement QGIS (logiciel de système d'information géographique Quantum). L'analyse a été divisée en deux parties principales :

1. **Analyse des stations situées directement sur l'autoroute** : une zone tampon de 220 mètres a été créée des deux côtés de l'autoroute afin de recenser les points de recharge dans les aires de repos. Ceux-ci ont été regroupés en « pools de recharge » et leurs distances le long de l'autoroute ont été mesurées afin de vérifier le respect de la règle des 60 km.

2. **Analyse selon la « règle des 3 km »** : la disponibilité des infrastructures de recharge dans un rayon de 3 km autour des sorties d'autoroute a été examinée. À l'aide des données OpenStreetMap, les routes ont pu être reconstituées dans QGIS et reliées aux points de recharge des données gouvernementales. Il est apparu que les villes de Strasbourg et de Mulhouse apportaient une contribution particulièrement importante, car une grande partie de leur infrastructure de recharge est directement adjacente à l'autoroute. Il en résulte des pools de recharge qui peuvent être attribués à l'entrée et à une sortie et qui jouent également un rôle dans le respect des exigences du réseau RTE-T.

Résultats et recommandations

Les analyses montrent des différences significatives dans le développement de l'infrastructure de recharge entre les trois pays de la région du Rhin supérieur.

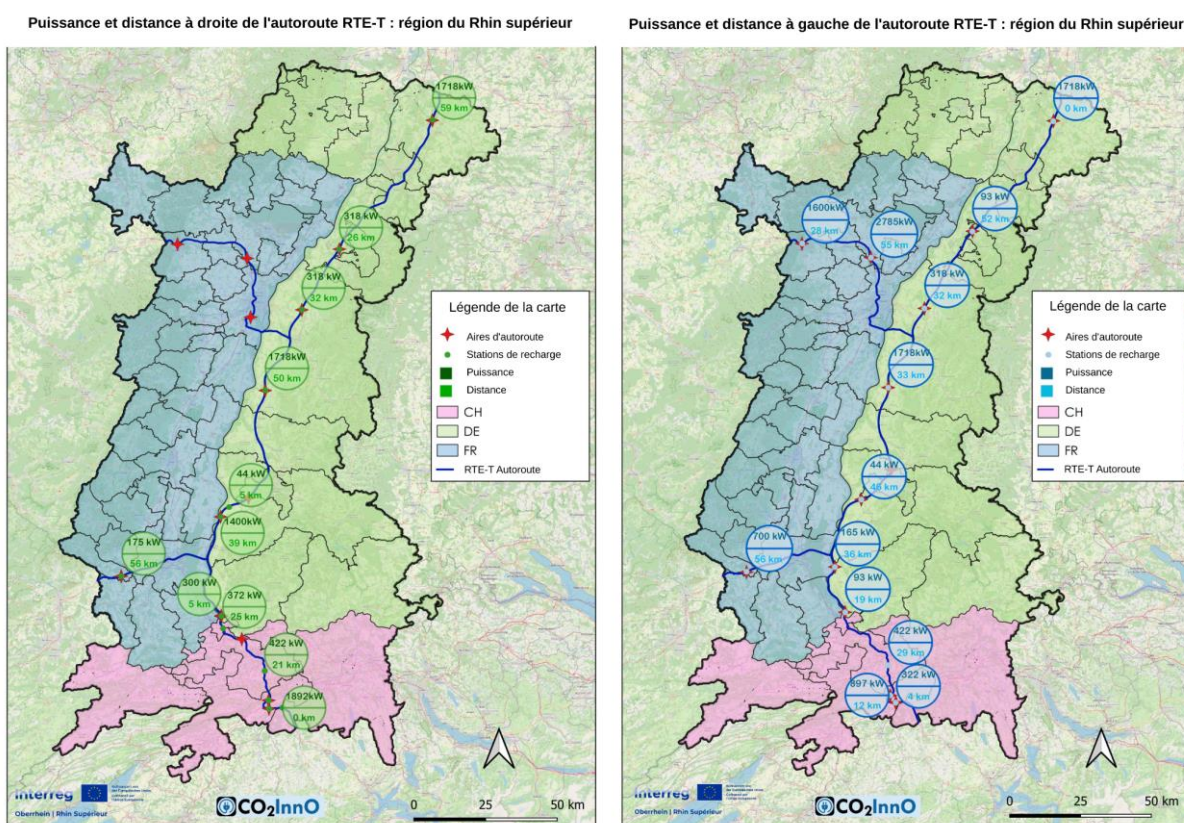


Figure III-7: Puissance de recharge disponible par rapport aux exigences AFIR dans le corridor RTE-T de la région du Rhin supérieur (droite et gauche)

Stations de recharge situées directement sur l'autoroute RTE-T

- **Suisse** : l'infrastructure de recharge est généralement bien développée et les stations de recharge sont généralement situées à moins de 60 km les unes des autres, comme l'exige la réglementation. La plupart des stations répondent aux exigences de puissance, bien qu'un pool de recharge de 322 kW ait été identifié comme inférieur à l'exigence de 400 kW.
- **Allemagne** : l'Allemagne dispose également d'un réseau relativement dense qui répond largement à l'exigence des 60 km. Cependant, un nombre considérable de ces stations n'atteignent pas encore la puissance totale requise de 400 kW.
- **France** : on constate ici un manque important d'infrastructures de recharge adéquates selon l'AFIR. Il existe de longs tronçons sans stations de recharge et les quelques stations existantes ne répondent souvent pas à l'exigence de puissance de 400 kW.

Analyse selon la « règle des 3 km »

- **Allemagne** : en dehors des autoroutes, l'Allemagne dispose d'une capacité de recharge très élevée, de nombreux sites affichant des puissances totales bien supérieures à 1 500 kW.
- **Suisse** : la Suisse affiche une puissance de recharge modérée à élevée, particulièrement forte sur le côté droit de la chaussée du corridor de transport avec des valeurs supérieures à 3 000 kW.
- **France** : en comparaison, la capacité de recharge plus faible et moins constante.

L'analyse de la capacité de recharge dans un rayon de trois kilomètres a montré qu'une grande partie de la capacité de recharge est disponible dans les grandes villes, à proximité des autoroutes. En France notamment, où les autoroutes traversent parfois des zones urbaines, la règle des 60 km est respectée, même si la capacité de recharge installée le long de l'autoroute elle-même n'est pas suffisante pour répondre aux exigences de l'AFIR.

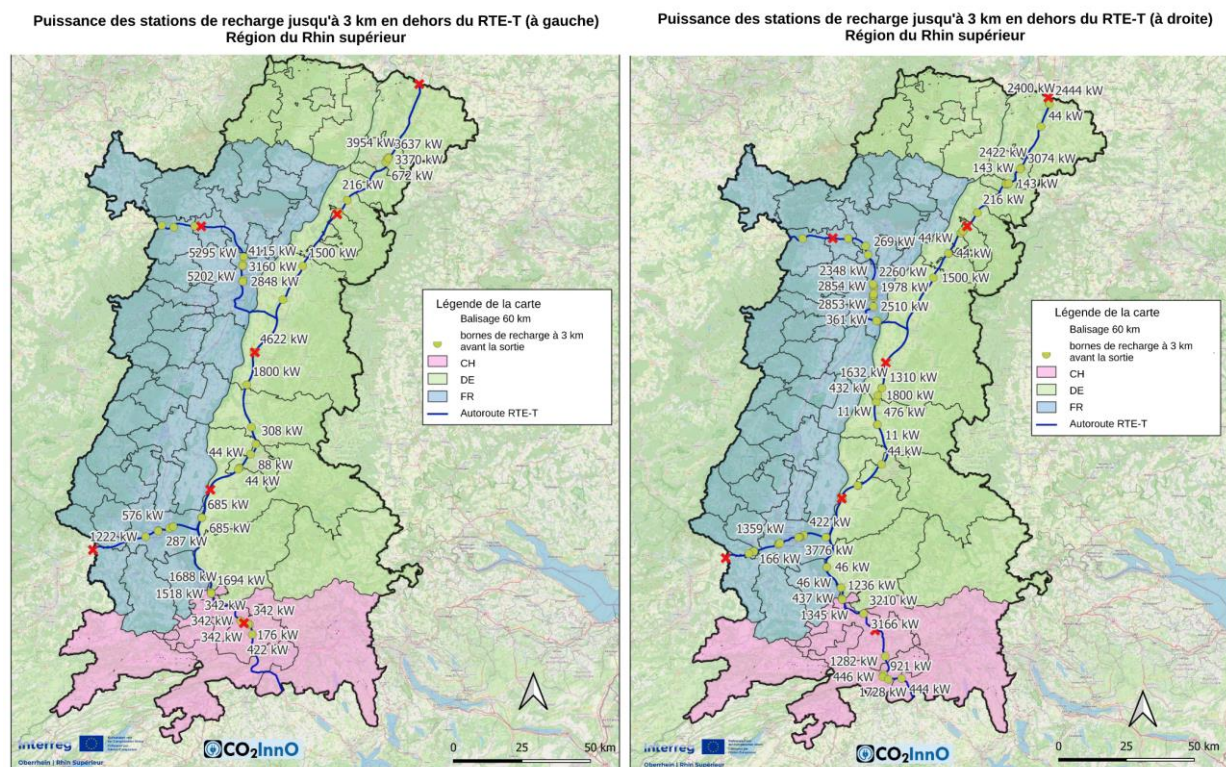


Figure III-8: Puissance de recharge disponible jusqu'à 3 km à l'extérieur du corridor RTE-T de la région du Rhin supérieur (à gauche et à droite)

L'analyse de l'infrastructure de recharge pour les véhicules électriques le long du réseau central RTE-T dans la région du Rhin supérieur montre un fossé évident entre l'Allemagne et la Suisse d'une part, et la France d'autre part. Alors que l'Allemagne et la Suisse ont réalisé des progrès SIGnificatifs dans la mise à niveau de la capacité de recharge, la France présente quelques écarts par rapport aux exigences de l'AFIR le long du corridor RTE-T en ce qui concerne les raccordements autoroutiers. Toutefois, si l'on considère également la puissance disponible dans un rayon de trois kilomètres autour des sorties d'autoroute, on constate que la puissance de recharge disponible est importante dans le cadre de la règle des 3 km, en particulier autour des grandes villes françaises. À l'heure actuelle, on ne sait toutefois pas encore comment ces deux exigences pourront être conciliées à la date butoir. Pour atteindre les objectifs de l'UE en matière de mobilité durable d'ici 2025, des investissements considérables et un développement stratégique sont nécessaires afin de garantir une recharge fluide et fiable pour tous les conducteurs de véhicules électriques dans cet important corridor européen. En **France**, le nombre et la puissance des stations de recharge doivent être augmentés, et en **Allemagne**, la mise à niveau de la capacité de puissance des stations de recharge qui ne répondent pas encore à l'exigence de 400 kW doit être accélérée afin de se conformer pleinement aux exigences de l'AFIR le long des corridors de transport.

Analyses de l'utilisation des points de recharge publics au moment de l'enregistrement et dans différents scénarios de mobilité

III.3.6.1. Scénarios de développement pour les besoins en électricité de la mobilité électrique dans la région du Rhin supérieur

III.3.6 La question du besoin d'extension de l'infrastructure publique de recharge préoccupe les décideurs politiques depuis un certain temps déjà. C'est pourquoi plusieurs études ont été menées sur ce sujet. Différentes études aboutissent à des valeurs clés différentes pour l'évaluation des besoins d'extension. Dans le cadre de l'analyse CO2InnO, les valeurs clés suivantes ont été jugées très pertinentes:

1. Le nombre de véhicules électriques
2. L'utilisation de l'infrastructure de recharge
3. La part de la puissance qui doit être disponible dans l'espace public.

Du côté allemand, la NOW GmbH (Organisation nationale pour la technologie de l'hydrogène et des piles à combustible) s'occupe du développement de l'infrastructure de mobilité électrique au niveau national. Dans la nouvelle édition de l'étude « Ladeinfrastruktur nach 2025/2030 » (Infrastructure de recharge après 2025/2030) (2024)²¹, plusieurs scénarios sont discutés pour la montée en puissance du marché des véhicules électriques, à batterie et hybrides. La NOW part du principe qu'en 2030, le parc automobile allemand comptera 17 millions de véhicules électriques (BEV+PHEV). À l'avenir, plus d'un tiers des véhicules particuliers allemands seraient alors électriques. Ceux-ci auraient besoin au total de 37,8 TWh d'électricité par an. 16 TWh seraient chargés dans l'espace public, ce qui correspond à 42 % de la quantité d'énergie. Selon le scénario, la structure de l'infrastructure de recharge varie, certains scénarios prévoyant nettement plus de points de recharge normaux et d'autres moins, mais des points de recharge haute performance plus puissants. Les données du rapport indiquent une utilisation calculée des points de recharge d'environ 10 % dans le scénario de référence, ce qui correspond approximativement à l'utilisation actuelle.

Du côté français, l'Avere a compilé et comparé les résultats de différentes études. L'étude de l'ICCT de 2021²² est particulièrement importante à cet égard. Elle prévoit 8,5 millions de véhicules électriques en France en 2030, ce qui correspond à environ 20 % des véhicules privés en France. Cela signifie que la demande en électricité pour les véhicules électriques devrait être multipliée par 16 par rapport à 2020 et atteindre 16 TWh. L'Avere cite toutefois une autre étude réalisée par le CODA en 2019, qui prévoit un nombre nettement inférieur de véhicules électriques, à savoir seulement 5,3 millions (Avere, 2023)²³. L'Avere conclut

²¹https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2024/06/Studie_Ladeinfrastruktur-2025-2030_Neuaufgabe-2024.pdf

²² https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/12/france-evs-infrastructure-transition-nov21_0.pdf

²³ <https://www.avere-france.org/publication/etude-publication-de-letude-hit-the-road/>

globalement que 28 % de l'électricité devra probablement être consommée dans les espaces publics et 72 % à domicile ou sur le lieu de travail.

Sur la base de ces chiffres, on constate qu'il n'existe pas de consensus uniforme sur le développement du parc de véhicules électriques dans la région du Rhin supérieur. Les différences dans les hypothèses, mais aussi peut-être dans le comportement de la population, qui est représenté dans la modélisation, conduisent à des résultats très différents. Pour y remédier, les chercheurs ont décidé de prévoir les besoins en électricité indépendamment du calendrier fixé et de les rendre tangibles à l'aide de scénarios. Les chiffres mentionnés ci-dessus sont très pertinents pour comprendre la demande. Le nombre de véhicules électriques est le facteur le plus important, car plus il y a de VE, plus la demande est forte. Pour les scénarios, le statu quo avec environ 5 % de véhicules électriques dans le parc automobile et des parts de 25 %, 50 %, 75 % et 100 % ont été utilisés. Cela permet de séparer l'électrification du parc automobile de l'évolution dans le temps et d'examiner ce à quoi on pourrait s'attendre en cas d'électrification complète.

Les scénarios diffèrent également en ce qui concerne la part supposée des recharges publiques. Celle-ci est encore très faible à l'heure actuelle, car la plupart des recharges s'effectuent à domicile, comme l'ont confirmé les demandes adressées à OBELIS²⁴ et aux gestionnaires de réseaux de distribution. À l'avenir, cependant, toutes les places de stationnement à domicile ne pourront pas être électrifiées et de plus en plus d'utilisateurs devront recourir à l'infrastructure de recharge publique. C'est pourquoi la part de la flotte électrifiée a également été combinée avec différents taux de recharge publique afin de mettre en évidence les évolutions possibles. Dans ce qui suit, ce rapport est appelé « part de recharge ». Il n'est possible de déterminer que dans une fourchette la quantité d'électricité rechargée dans l'espace public et la quantité rechargée dans l'espace privé. Les valeurs supposées dans la littérature varient entre 15 % et 30 % pour les besoins actuels, selon le lieu (BDEW, 2021 ; NOW, 2024 ; Adrenacci et Valentini, 2023)²⁵²⁶²⁷²⁸. En moyenne, toutefois, 20 % peut être considéré comme une valeur réaliste pour la situation actuelle. Les valeurs de la part de recharge dans le calcul de l'électricité rechargée dans les lieux publics commencent à environ 20 % et vont jusqu'à 35 %, 50 % et 65 %. Comme décrit ci-dessus, une valeur réaliste pour la part de l'électricité chargée en public d'ici 2030 se situe entre 28 % et 42 %. Afin d'élargir

²⁴ OBELIS : rapport en ligne sur l'infrastructure de recharge

²⁵ https://www.bdew.de/media/documents/211220_Fakten_und_Argumente_Ladeinfrastrukturbedarf_deutsch_v02.pdf

²⁶ <https://nationale-leitstelle.de/wp-content/uploads/2024/06/Studie-LIS-2025-2030-Neuaufgabe-2024.pdf>

²⁷ https://nationale-leitstelle.de/wp-content/uploads/2024/10/Studie_Einfach_zu_Hause_laden.pdf

²⁸ <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/23/12877>

l'horizon temporel, un scénario à 65 % a également été ajouté, car une augmentation de la part des voitures électriques devrait entraîner une utilisation publique plus importante.

Le graphique ci-dessous illustre la modélisation de la demande dans l'espace public pour différentes combinaisons de parts de recharge sous forme de courbes et de taux d'électrification sur l'axe des x. La demande de chaque combinaison en TWh est indiquée sur l'axe des y. Avec l'électrification croissante de la flotte, la demande augmente de manière linéaire. La part de recharge modifie considérablement le résultat de la puissance nécessaire, car elle est un multiplicateur dans le calcul des besoins.

Selon l'augmentation de la part d'énergie consommée dans l'espace public, la quantité d'électricité nécessaire augmente considérablement. Dans la littérature existante, même avec une part d'électricité de 30 %, entre 28 % et 47 % de la puissance sera consommée dans l'espace public. C'est pourquoi la courbe en pointillés a été introduite dans le graphique. Elle décrit un scénario de développement possible dans lequel, en fonction du degré d'électrification, la part de la recharge publique augmente d'abord de manière disproportionnée, puis atteint un point de saturation. Il est évident que la part de l'électricité rechargée dans les espaces publics est déterminante pour l'ampleur des besoins. Ainsi, l'estimation pour la région du Rhin supérieur va de moins d'un TWh à près de 5 TWh. On peut supposer qu'à l'avenir, la quantité d'électricité rechargée dans les espaces (semi-)publics sera plus importante qu'aujourd'hui. Si 35 % de la puissance est rechargée dans les espaces publics, il faudrait un potentiel de recharge de plus de 2,5 TWh aux points de recharge publics. La puissance nominale nécessaire à cet effet dépend toutefois fortement du taux d'utilisation des points de recharge.

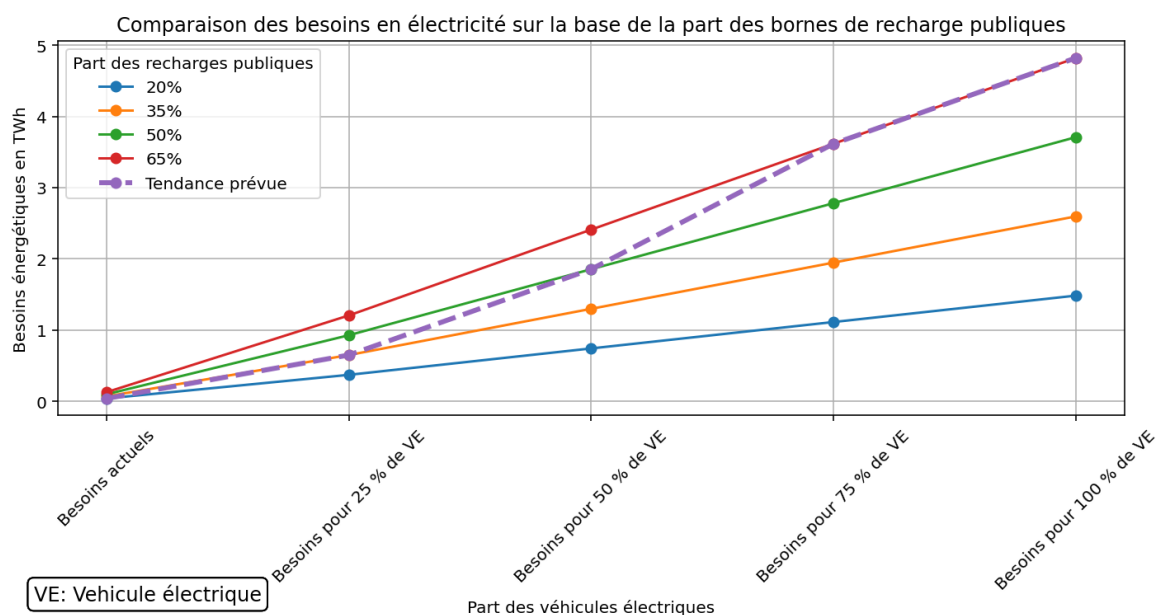


Figure III-9: Représentation des différents scénarios et des besoins en recharge (présentation personnelle)

III.3.6.2. Utilisation de l'infrastructure de recharge

Afin d'évaluer l'utilisation actuelle de l'infrastructure de recharge et les moments où la puissance de recharge est principalement sollicitée dans les différents scénarios, des données réelles sur l'utilisation provenant de deux sources différentes ont été analysées.

. Tout d'abord, les opérateurs Badenova AG et Naturenergie Hochrhein AG ont fourni des données détaillées sur la recharge pour l'année 2023. Deuxièmement, les données API de l'OFEN suisse pour le premier semestre 2025 ont été évaluées. Cette approche s'est avérée nécessaire car aucune donnée des opérateurs suisses n'était disponible, mais il était possible de créer notre propre ensemble de données à partir de données accessibles au public via une interface publique de l'OFEN²⁹. La fusion et l'évaluation de ces ensembles de données sont très importantes pour la région du Rhin supérieur, car il n'existe aucun ensemble de données open source exploitable de part et d'autre du Rhin³⁰. Les opérateurs français n'étaient pas disposés à fournir des données, de sorte qu'aucune analyse d'utilisation n'a pu être effectuée pour la France.

Les données présentent des structures différentes selon leur source. Les opérateurs enregistrent les processus de recharge individuellement, ce qui permet d'attribuer à chaque processus une quantité d'électricité exacte et une durée précise. Cet enregistrement détaillé permet une évaluation précise, car le début et la fin de chaque processus de recharge sont enregistrés à la minute près. Pour des raisons de protection des données et de concurrence, les données ont été anonymisées et agrégées pour l'analyse, de sorte qu'il n'est pas possible de déduire des emplacements ou des processus individuels. Pour les données provenant de l'API suisse, la résolution temporelle est de cinq minutes et il n'est pas possible d'identifier s'il s'agit d'un processus continu ou de processus de recharge distincts qui se succèdent rapidement. On peut néanmoins supposer que les deux types d'ensembles de données permettent une évaluation représentative de l'utilisation.

Les données d'utilisation des opérateurs ont en outre été ventilées par cas d'utilisation (privé et public), puis agrégées. Badenova a fourni des données sur les points publics et NaturEnergie a fourni, outre les points publics, les processus de recharge de LIS privés anonymisés. Cela a permis d'établir une comparaison intéressante. Après le traitement des ensembles de données et la correction des données erronées, il restait environ 500 points de recharge publics et 500 points de recharge privés pouvant être comparés. Vous trouverez ci-dessous les modèles d'utilisation moyens ventilés par ensemble de données.

29

<https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/digitalisierung-und-geoinformation/programmierschnittstellen/ich-tanke-strom-api.html>

³⁰ En Europe, les données relatives aux processus de recharge sont de toute façon très rares. C'est pourquoi les données collectées en Suisse dans le cadre du projet, qui comptent plus de 32 millions d'entrées, sont mises à disposition gratuitement.

Afin d'éliminer les processus de recharge erronés ou incomplets, les ensembles de données ont été nettoyés. Pour être pris en compte dans l'analyse, les points de recharge devaient avoir été disponibles au moins 50 % de l'année et un processus de recharge réussi devait avoir été documenté. Le taux d'utilisation a été calculé comme le rapport entre le temps utilisé et le temps disponible.

Cependant, le taux d'utilisation seul ne donne pas une image complète de l'état de l'infrastructure et des besoins réels. Des scénarios de besoins ont donc été développés en complément afin de montrer précisément où et dans quelle mesure des capacités de puissance sont nécessaires pour l'électrification des flottes.

L'électrification du parc automobile européen progresse, mais n'a pas encore atteint un rythme rapide. Afin de déterminer les besoins énergétiques futurs dans la région du Rhin supérieur, plusieurs scénarios ont été développés pour estimer les besoins à l'aide de quotas. Les chiffres d'immatriculation au niveau des districts ont été utilisés pour élaborer ces scénarios. Plusieurs scénarios avec différentes proportions de véhicules électriques à batterie (BEV) et de véhicules électriques hybrides rechargeables (PHEV) ont été modélisés. Les spécifications AFIR ont également été appliquées au niveau des districts afin d'obtenir une valeur comparative.

Afin de garantir la comparabilité des calculs, certaines variables ont été considérées comme fixes. D'une part, le parc actuel de véhicules immatriculés a été utilisé pour tous les scénarios et considéré comme stagnant. D'autre part, il a fallu chiffrer la part de la puissance nécessaire qui sera chargée dans l'espace public. Pour la modélisation, cette part a été estimée à 20 %. Cette valeur a également été considérée comme constante. Cependant, il sera réaliste de supposer qu'à l'avenir, davantage d'électricité devra être chargée dans l'espace public, car toutes les places de stationnement privées ne peuvent pas être électrifiées et tous les véhicules électriques à batterie (BEV) ou hybrides rechargeables (PHEV) ne disposeront pas de leur propre place de stationnement. La consommation électrique totale de toutes les voitures électriques est calculée à partir de la consommation moyenne des véhicules multipliée par le kilométrage annuel. Ces valeurs ont été estimées à 2 000 kWh/an pour un BEV (cf. ADAC, 2025)³¹ et 12 545 km/an (cf. KBA, 2024)³². L'utilisation des bornes de recharge varie considérablement selon l'emplacement. Des valeurs comprises entre 3 % et 30 % sont ainsi possibles (Tagesschau, 2025)³³. L'utilisation moyenne des bornes de recharge a été estimée ici à 12,5 %, ce qui correspond aux résultats de l'analyse d'utilisation et à la littérature courante

³¹ <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/elektroauto/stromverbrauch-elektroautos-adac-test/>

³² https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/vk_inlaenderfahrleistung/2022/verkehr_in_kilom etern_kurzbericht_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3

³³ <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/ladesaeulen-infrastruktur-ausbau-gedrosselt-e-autos-100.html>

(Fraunhofer ISE/ISI, 2024)³⁴ . Sur la base de ces hypothèses, des scénarios avec respectivement 25 %, 50 %, 75 % et 100 % d'électrification ont pu être élaborés.

III.3.6.3. Résultats des analyses d'utilisation des structures de recharge publiques

L'analyse des processus de recharge montre clairement que l'utilisation est plus élevée en début de semaine qu'en fin de semaine. On observe une tendance à la baisse très nette tout au long de la semaine. L'utilisation moyenne par jour passe d'un peu plus de 10 % à environ 8,6 %. Même si cette baisse semble modérée à première vue, elle fournit des informations précieuses sur le comportement des conducteurs de véhicules électriques. Il est fort possible que ce comportement de recharge soit fortement influencé par le modèle de mobilité fondamental des utilisateurs, qui est principalement déterminé par les trajets domicile-travail. Il reste à déterminer si le comportement de recharge diffère de manière significative du comportement de ravitaillement en carburant des conducteurs de véhicules équipés de moteurs à combustion conventionnels.

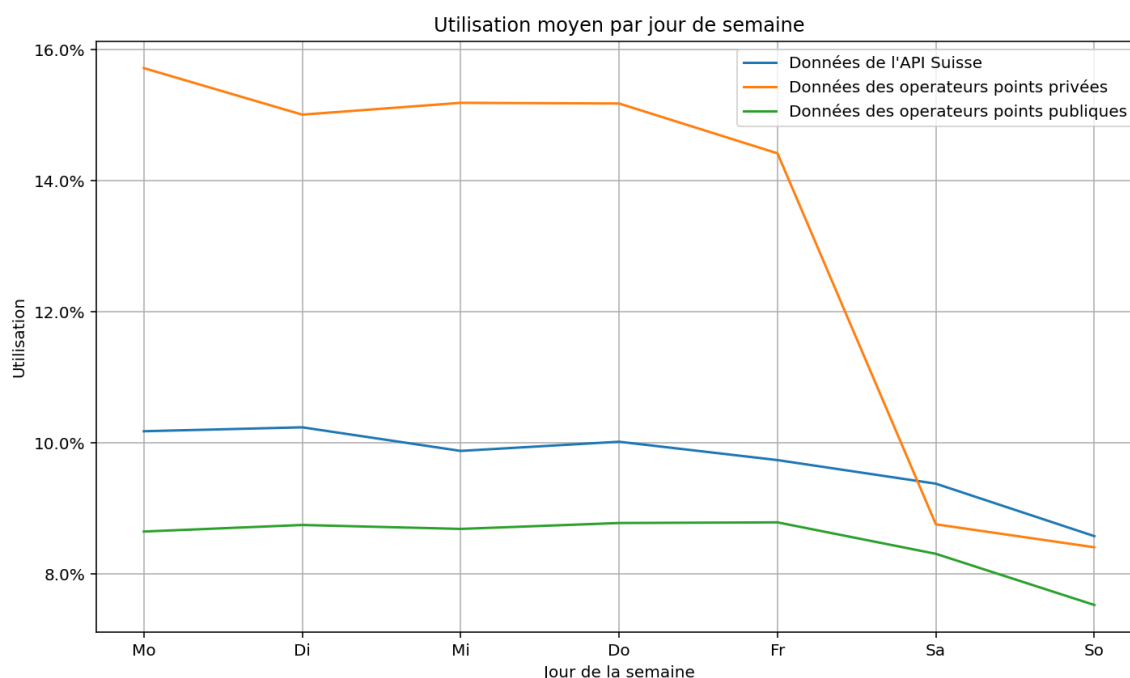


Figure III-10: Évolution hebdomadaire et utilisation moyenne des bornes de recharge publiques API : interface de programmation fournissant des données sur l'utilisation.

³⁴ Potentiel des places de stationnement dans les bâtiments résidentiels et non résidentiels pour la mise à disposition d'infrastructures de recharge privées (https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Studie_Ladeinfrastruktur_MFH_und_Nichtwohngebaeude.pdf)

Une autre analyse porte sur l'utilisation au cours d'une journée. La Figure III-11, présente l'évolution de l'utilisation de 0 à 24 heures. Pendant la journée, entre 9 et 15 heures, l'utilisation est la plus élevée avec environ 11 %, le maximum étant atteint vers 10 heures avec 11,5 %.

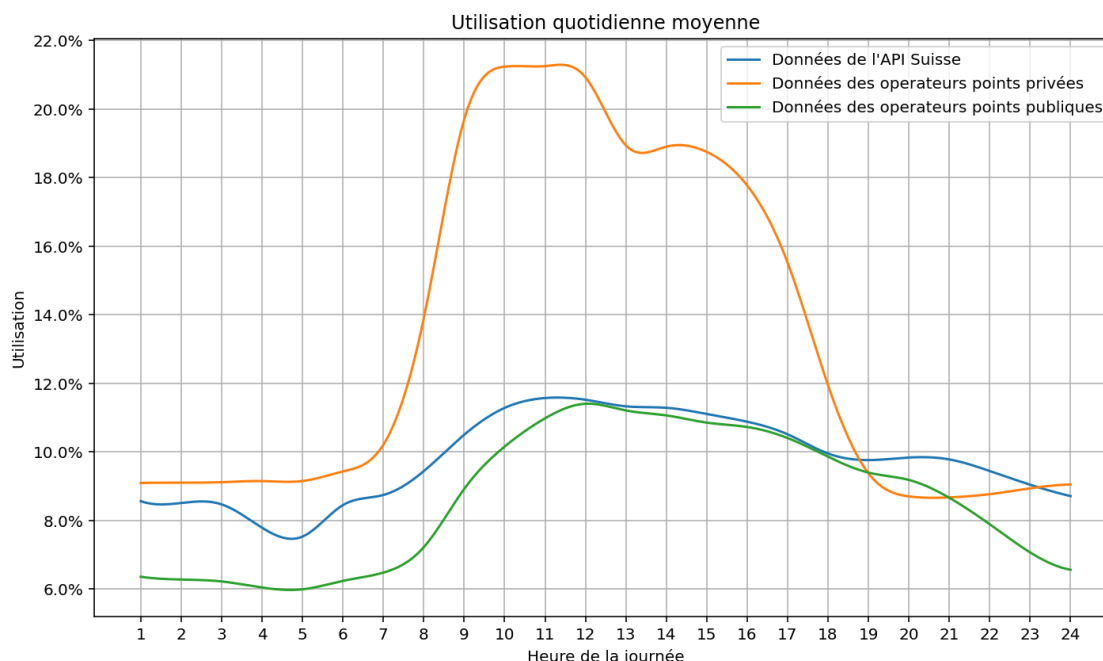


Figure III-11: utilisation des bornes de recharge publiques par heure

Le taux d'utilisation moyen est de 9,9 %. Il convient de noter la part des recharges qui ont lieu pendant la nuit et qui représentent ainsi une certaine charge minimale. En moyenne, 8 % des bornes de recharge sont encore occupées à minuit dans les stations suisses. Il est fort possible que certains utilisateurs ne disposent pas de leur propre place de stationnement avec possibilité de recharge et se rabattent donc sur les infrastructures publiques (Andrenacci et Valentini, 2023).

Les points de recharge publics confirment les conclusions de la littérature existante, selon lesquelles la plupart des recharges ont lieu pendant la journée et en semaine (cf. Hecht et al., 2024). La fréquentation la plus élevée est presque toujours observée pendant la première moitié de la semaine, suivie d'une baisse marquée le week-end, visible dans toutes les données examinées sur les bornes de recharge publiques. Ces tendances ont également été mises en évidence lors de la comparaison de la fréquentation sur un mois. Une explication possible est que les véhicules électriques sont utilisés beaucoup plus souvent en semaine, notamment pour les trajets domicile-travail et les courses, que le week-end, ce qui explique l'augmentation de la demande. Les points de recharge privés suivent un schéma différent de celui décrit dans la littérature existante. On observe une tendance à recharger plus tard, mais, comme pour l'utilisation publique, peu de recharges ont lieu pendant la nuit. L'utilisation des stations de recharge privées diminue considérablement le week-end, ce qui est atypique pour

les points de recharge privés. Cependant, l'utilisation des points de recharge privés est en moyenne plus élevée que celle des points publics, ce qui est également typique. Même si les résultats concernant l'utilisation privée ne reposent que sur quelques échantillons, la tendance peut être observée. Les résultats concernant l'utilisation moyenne des points de recharge sont les suivants :

- points de recharge publics (DE + SUI) : 13,61 %
- points de recharge privés (DE) : 18,96 %

Les modèles d'utilisation des infrastructures de recharge publiques dans la région du Rhin supérieur semblent similaires du côté allemand et suisse.

Le fait est que l'utilisation des infrastructures de recharge publiques et privées n'est pas encore très élevée et qu'il existe encore un potentiel dans ce domaine. Pour les exploitants de systèmes d'infrastructures de recharge, un taux d'utilisation élevé est essentiel pour amortir les coûts fixes élevés liés à la mise en place et à l'exploitation, en particulier dans le cas des stations de recharge à haute puissance. L'utilisation visible dans tous les ensembles de données suggère un taux d'utilisation plus faible dans la région du Rhin supérieur que la moyenne nationale de 17 % en Allemagne (BDEW, 2024)³⁵. Une utilisation plus élevée est souhaitable, mais la stabilité du réseau doit être garantie et l'infrastructure de recharge ne doit pas être surchargée aux heures de pointe. Les résultats suivants, qui indiquent la puissance de charge dans différents scénarios de part de mobilité électrique, devront à l'avenir également tenir compte des différentes charges. Les scénarios présentés ci-dessous ne prennent pas encore en compte les différentes charges, car cela n'était plus possible dans le cadre du projet.

III.3.6.4. Scénario pour le développement de la puissance de recharge par rapport à la puissance de recharge existante

Le Tableau III-5 présentes les besoins annuels actuels en électricité en kWh pour les régions allemande, française et suisse ainsi que pour l'ensemble de la région du Rhin supérieur pour la recharge des voitures électriques et les besoins correspondants dans les quatre scénarios. Ceux-ci sont calculés à partir de la taille du parc automobile (n_{PKW}) multipliée par la consommation annuelle d'un véhicule électrique à batterie (P_{annual}), qui est en moyenne de 2000 kWh, multipliée par la part de la recharge publique (p_{charge}), qui est actuellement d'environ 20 % (cf. chapitre précédent).

³⁵ https://www.bdew.de/media/documents/BDEW_Elektromobilit%C3%A4tsmonitor_2024-1.pdf

$$P_{\text{demand}} = n_{\text{PKW}} * P_{\text{annual}} * p_{\text{charge}}$$

Tableau III-5: Besoins annuels totaux en électricité pour les voitures électriques en kWh pour l'Allemagne, la France et la Suisse actuellement et dans quatre scénarios

Pays	Aktuell	25%	50%	75%	100%
DE	102.124.000	865.082.000	1.730.164.000	2.595.246.000	3.460.328.000
FR	41.766.000	567.196.000	1.134.392.000	1.701.588.000	2.268.784.000
SUI	51.786.000	422.000.500	844.001.000	1.266.001.500	1.688.002.000
Région du Rhin supérieur dans son ensemble	195.676.000	1.854.278.500	3.708.557.001	5.562.835.501	7.417.114.001

Actuellement, dans la région du Rhin supérieur, environ 195,6 millions de kWh d'électricité sont nécessaires chaque année pour les 152 191 voitures électriques et hybrides actuellement en circulation. À l'avenir, avec une part de 50 % de voitures électriques à batterie, cette consommation passera à 3 708,6 millions de kWh par an, et même à 5 562,8 millions de kWh ou 5,6 TWh en cas d'électrification complète avec 3,7 millions de voitures électriques. Malgré cette augmentation considérable des besoins énergétiques liés à la mobilité électrique, on estime que l'électrification, avec 15 millions de voitures électriques en Allemagne, n'augmentera la demande totale d'électricité que d'environ 3 à 4 % (Vattenfall, 2025)³⁶. La demande totale d'électricité dans la région du Rhin supérieur devrait donc rester relativement modérée. La spécification AFIR peut être utilisée comme valeur de référence pour l'ordre de grandeur de l'infrastructure nécessaire. Elle stipule qu'une puissance de 1,3 kW doit être installée par BEV immatriculé et de 0,8 kW par PHEV.

Tableau III-6: Comparaison de la puissance de charge installée avec la directive AFIR

pays	Nombre de points de recharge installés (2024)	Puissance installée en kW (2024)	AFIR-Spécification en kW
DE	4.180	175.434	89.225,4
FR	2.136	113.680	37.469,5
SUI	2.267	85.812	43.976,9
Région du Rhin supérieur dans son ensemble	8.583	374.926	170.672

Si l'on compare les valeurs résultant de la directive avec la puissance actuellement installée, on constate qu'à l'heure actuelle, la puissance installée dans la région du Rhin supérieur est

³⁶ <https://www.vattenfall.de/infowelt-energie/e-mobility/emobility-und-netz>

en moyenne presque deux fois supérieure à la valeur prescrite, et même nettement supérieure en France.

Une comparaison de la puissance de charge disponible par véhicule montre que la France, avec une moyenne de 5,4 kW par véhicule électrique, est nettement en avance sur l'Allemagne et la Suisse, où la valeur est d'environ 3,4 kW par véhicule. Cela s'explique par le fait que moins de voitures électriques sont immatriculées du côté français du Rhin supérieur, ce qui signifie que la puissance installée par véhicule y est plus élevée. Il est évident que la France dispose d'une infrastructure de recharge à haute puissance importante et que son développement se poursuit.

La cartographie des points de recharge permet d'étudier plus précisément la répartition spatiale de la puissance de recharge pour différents scénarios. Tous les calculs ont donc été effectués pour tous les scénarios pour les arrondissements, cantons et intercommunalités de la région du Rhin supérieur (voir annexe). L'évaluation différenciée selon les zones géographiques permet de bien identifier les besoins d'extension les plus importants parmi les différents scénarios. Pour une flotte entièrement électrifiée, les sous-régions mentionnées dans le chapitre consacré à la cartographie des points de recharge publics et présentant une colonne rouge élevée ont particulièrement besoin de rattraper leur retard, car c'est là que l'infrastructure publique de recharge est actuellement la moins développée. En revanche, les zones densément peuplées *d'Argovie, de Karlsruhe, de l'Ortenaukreis, de Strasbourg et de Soleure* sont déjà bien desservies, même avec 100 % de véhicules électriques. Cependant, toutes les zones doivent encore améliorer leurs infrastructures afin de fournir la puissance de recharge nécessaire pour 100 % de véhicules électriques. Les deux cartes suivantes présentent une représentation visuelle de la répartition spatiale de la puissance de recharge. Elles comparent la puissance de recharge existante répartie dans l'espace dans deux scénarios avec 50 % et 100 % de BEV/PHEV.

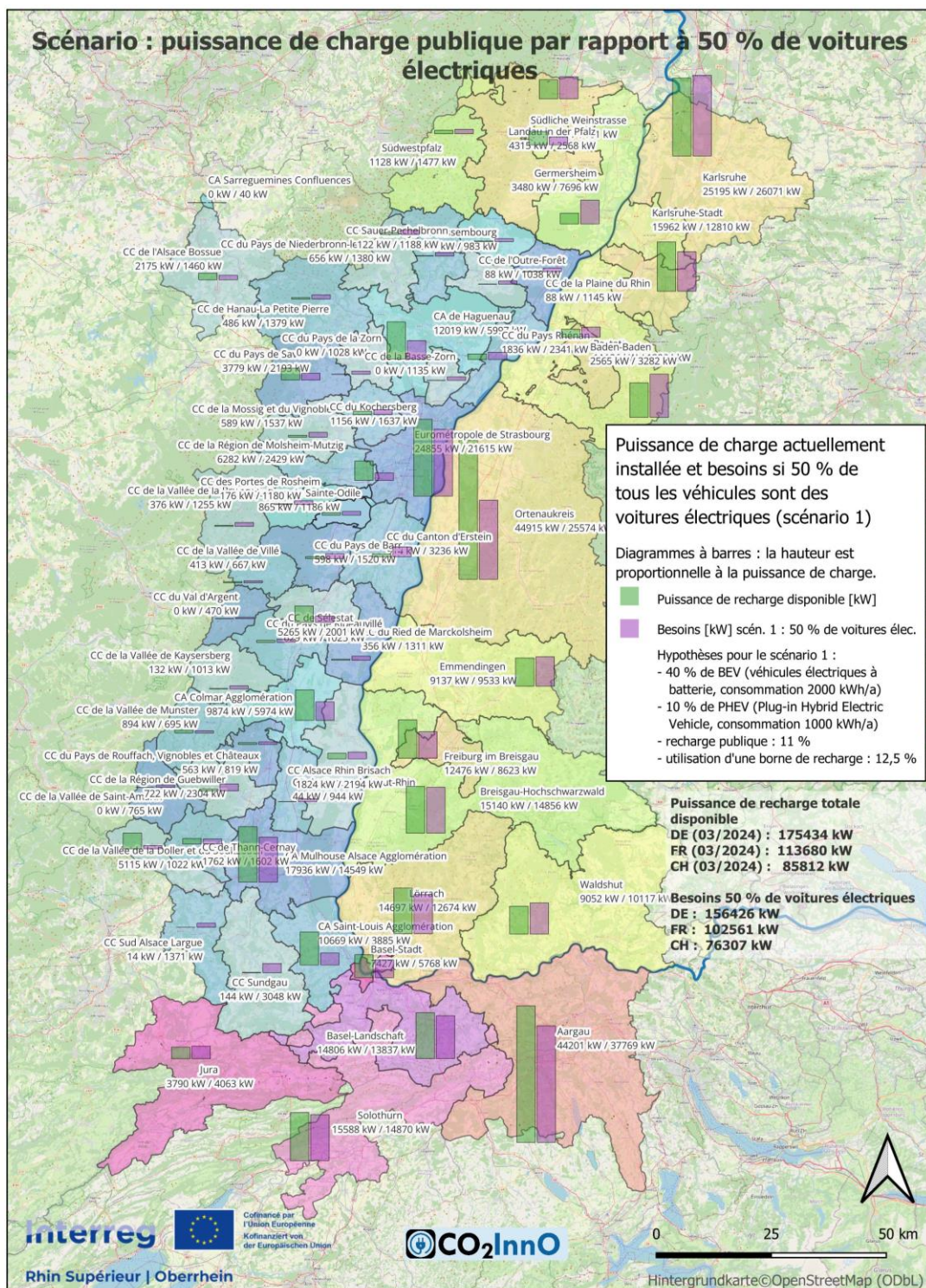


Figure III-12: Scénario 50 % EVs : besoins en recharge vs infrastructure de recharge disponible en Allemagne/France/Suisse

Électrification des stations-service

Les stations-service sont considérées comme des hubs de recharge potentiels³⁷ pour l'avenir. Pour l'analyse, les données OSM sur les stations-service ont été combinées avec les points de recharge issus des données gouvernementales. Une analyse de proximité (rayon de 50 mètres) a permis d'attribuer les points de recharge.

III.3.7.

La région du Rhin supérieur compte 1 536 stations-service, dont 130 disposent également d'une infrastructure de recharge. Malgré leur faible proportion (< 10 %), celles-ci se caractérisent par une puissance de recharge moyenne élevée (460 kW).

La carte QGIS disponible à l'adresse Figure III-14 donne un aperçu des stations-service présentes dans la région du Rhin supérieur. Afin de mieux différencier les stations-service classiques de celles équipées de bornes de recharge, les stations-service électrifiées ont été classées par couleur en fonction de la puissance de recharge disponible. La représentation distingue :

- points gris : stations-service classiques pour carburants fossiles
- points bleus : stations-service à hydrogène
- points rougeâtres : stations-service électrifiées avec bornes de recharge
- Les nuances de rouge indiquent la puissance de recharge
 - -orange/rouge clair = <150 kW
 - - rouge = 150 à 400 kW
 - - rose = >400 kW.

Comme on pouvait s'y attendre, le nombre de stations-service est élevé dans les zones urbaines, et le canton d'Argovie présente également une densité remarquablement élevée de stations-service. On remarque également une densité plus élevée de stations-service électrifiées entre Strasbourg et Fribourg, en particulier dans la région autour de Herbolzheim, Ringsheim et Orschweier, où se trouve l'Europapark Rust.

Dans l'ensemble, on peut supposer que la répartition des stations-service est dictée par le marché. Là où la demande est forte, on trouve également de nombreuses stations-service. Pour l'électrification du parc automobile, on dispose ainsi déjà d'une première indication de la demande en bornes de recharge pour voitures électriques. L'intégration de bornes de recharge dans les stations-service est conforme aux exigences de l'AFIR et aux lois nationales qui obligent les exploitants à les installer. Actuellement, la loi prévoit qu'à partir du 1er janvier 2028, les entreprises possédant au moins 200 stations-service devront en principe exploiter au moins une borne de recharge rapide accessible au public d'une puissance minimale de 150 kW dans chaque station-service.

³⁷ Installations centrales accessibles au public pour recharger plusieurs véhicules électriques

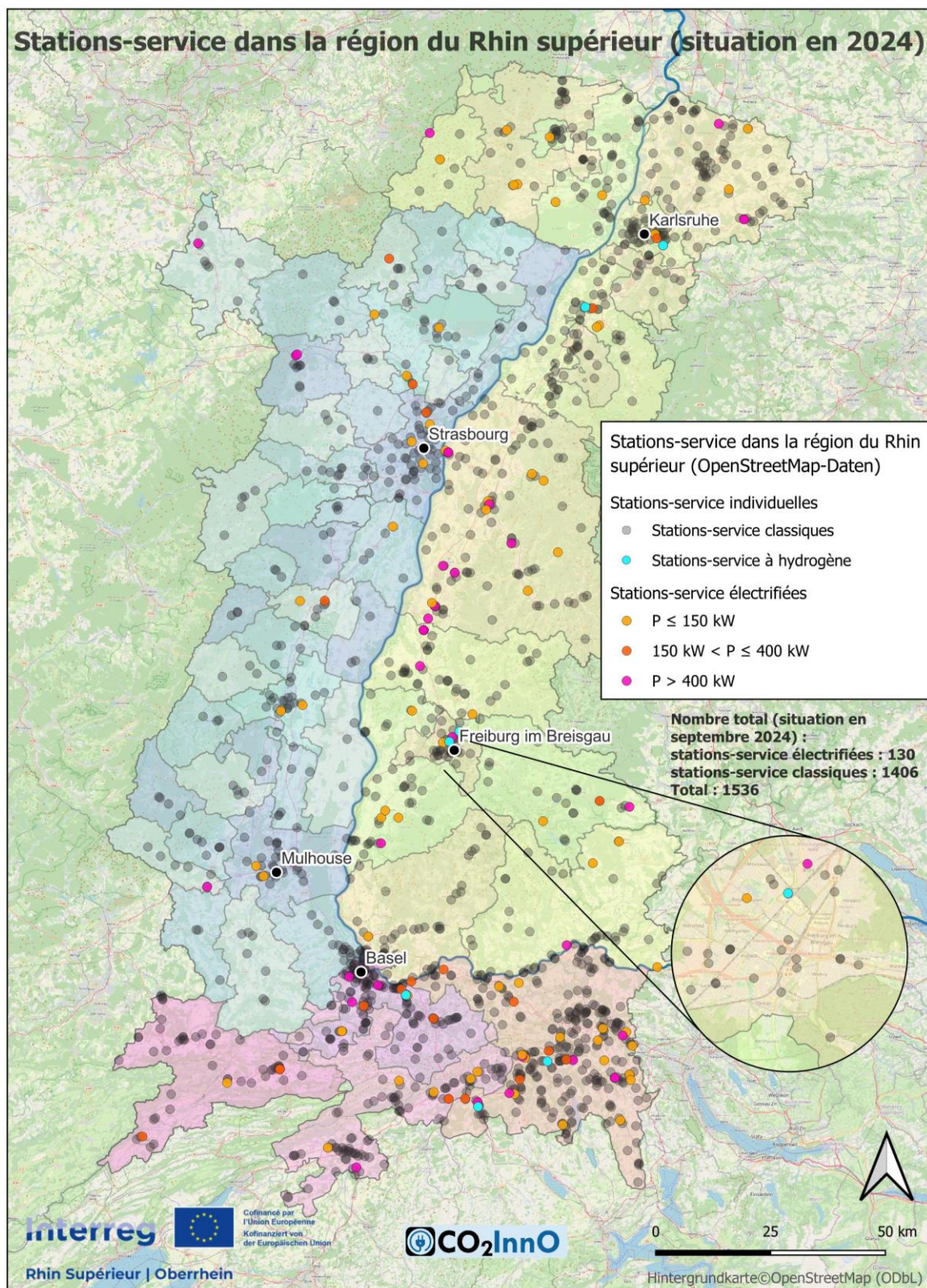


Figure III-14: QGIS carte: stations-service avec et sans infrastructure de recharge dans la région du Rhin supérieur

Le Vehicle-to-Grid (V2G) comme élément clé de la transition énergétique : une analyse critique des potentiels, des défis et des champs d'action

La transformation du système énergétique vers une structure décarbonée, décentralisée et numérisée représente l'un des défis majeurs du XXI^e siècle. Dans le cadre du développement des énergies renouvelables fluctuantes telles que le photovoltaïque et l'éolien, il devient III.3.8 essentiel de garantir la flexibilité afin d'assurer la stabilité du réseau. Le Vehicle-to-Grid (V2G), technologie permettant le transfert bidirectionnel d'énergie entre les véhicules électriques et le réseau électrique, fait l'objet d'une attention croissante de la part des milieux scientifiques, économiques et politiques. Les véhicules électriques ne sont plus seulement considérés comme des consommateurs, mais aussi comme des unités de stockage actives et décentralisées pouvant contribuer à la stabilisation du réseau.

III.3.8.1. Potentiels du Vehicle-to-Grid

Le V2G offre la possibilité de coupler intelligemment les secteurs de l'énergie et de la mobilité et de créer des synergies considérables. L'analyse de ce potentiel nécessite une approche multidimensionnelle qui englobe les aspects technologiques, économiques et écologiques.

Maturité technologique et contribution à la stabilité du réseau

L'affirmation selon laquelle la technologie de charge bidirectionnelle est « déjà disponible sur le plan technique » peut être confirmée, mais doit être nuancée. Si les composants électroniques de puissance de base existent dans les stations de recharge et les véhicules, la disponibilité à grande échelle sur le marché de véhicules de série compatibles V2G et de points de recharge privés (par exemple, les boîtiers muraux) est encore limitée. Des modèles tels que la Nissan Leaf ou la Ford F-150 Lightning prennent en charge cette technologie, mais la majorité des véhicules électriques sont actuellement limités à une recharge unidirectionnelle. La normalisation des protocoles de communication, en particulier la norme ISO 15118-20 (véhicules routiers - interface de communication entre le véhicule et la borne de recharge), est un facteur décisif qui garantit l'interopérabilité entre les véhicules, les bornes de recharge et le système backend des fournisseurs d'énergie et qui crée la base nécessaire à la mise à l'échelle (Yu et al., 2022).

Une prémisses fondamentale du concept V2G est la longue durée de vie des véhicules. L'étude souvent citée de Kempton & Tomić (2005) montre que les voitures particulières sont garées jusqu'à 95 % du temps. Malgré l'évolution des modes de mobilité, il existe donc une large fenêtre temporelle pendant laquelle les véhicules pourraient fournir des services au réseau. Pendant cette période, les véhicules compatibles V2G peuvent contribuer de manière quantifiable à la stabilisation du réseau. Leur fonction première est d'offrir une certaine flexibilité. Cela comprend plusieurs cas d'utilisation :

- **Régulation de fréquence (puissance de réglage primaire et secondaire) :**
grâce à des temps de réaction extrêmement rapides, les batteries des véhicules

peuvent compenser les fluctuations à court terme entre la production et la consommation et maintenir ainsi la fréquence du réseau dans la plage cible de 50 Hz (Han et al., 2010).

- **Régulation de la tension** : dans les réseaux électriques, la puissance réactive assure le bon **niveau** de tension du réseau. La puissance réactive est la partie de l'énergie électrique qui n'est pas directement consommée comme énergie utile (puissance active), mais qui sert à créer des champs électromagnétiques nécessaires, par exemple, aux moteurs ou aux transformateurs. En fournissant de la puissance réactive, les véhicules électriques peuvent contribuer au maintien de la tension locale dans les réseaux de distribution, ce qui est particulièrement important en cas d'alimentation élevée par des installations photovoltaïques décentralisées (Wang et al., 2021).
- **Déplacement de charge et écrêtement des pics (peak shaving)** : les véhicules électriques peuvent se recharger lorsque le prix de l'électricité est bas (par exemple la nuit ou lorsque la production photovoltaïque est élevée). Lorsque la charge du réseau est élevée et que les prix sont élevés, ils peuvent réinjecter l'énergie stockée dans le réseau électrique. Cela peut réduire le besoin de centrales électriques de pointe coûteuses et souvent alimentées par des énergies fossiles, et donc réduire les coûts d'extension du réseau. Une étude prévoit que ces mesures pourraient réduire les pics de charge jusqu'à 6 % (Agora Energiewende, 2023).

La synergie avec les installations de cogénération (CCE) mentionnée dans le texte original est plausible : alors que les installations de cogénération constituent une source d'énergie capable de couvrir la charge de base et guidée par la chaleur, le V2G peut fournir la flexibilité volatile nécessaire à court terme pour optimiser l'ensemble du système.

Potentiel économique et écologique

Les données quantitatives sur le potentiel du V2G sont ambitieuses, mais elles se retrouvent dans la littérature. Une étude très citée de DNV (*Det Norske Veritas - The Norwegian Truth*) pour le gestionnaire de réseau de transport TenneT prévoit pour 2040 des économies annuelles dans le système énergétique pouvant atteindre 22,2 milliards d'euros dans un scénario optimiste pour l'Europe. Ce montant résulte principalement de la réduction des coûts d'extension du réseau, de la diminution des coûts liés à la puissance de réglage et d'une utilisation plus efficace des énergies renouvelables (DNV, 2022). La réduction concomitante des besoins en batteries de stockage stationnaires pouvant atteindre 92 % souligne le potentiel du V2G pour éviter des redondances coûteuses sur le marché du stockage. Selon la même étude, la capacité de stockage théorique du parc de véhicules électriques européen pourrait

en effet atteindre 114 TWh d'ici 2040, ce qui augmenterait considérablement la capacité de stockage décentralisée.

Sur le plan écologique, le V2G permet une bien meilleure intégration des énergies renouvelables. Grâce à une recharge intelligente, l'électricité est consommée lorsqu'elle est disponible en abondance (par exemple à midi, lorsque l'ensoleillement est fort). La réinjection peut couvrir les pics de consommation en soirée et réduire ainsi l'utilisation des centrales à combustibles fossiles. Des études suggèrent que la puissance photovoltaïque installable peut être augmentée jusqu'à 40 % dans un scénario V2G sans surcharger le réseau (Agora Energiewende, 2023).

Les consommateurs finaux bénéficient également d'avantages significatifs. Des études telles que celle de Yao et al. (2022), qui analysent des contextes spécifiques de marché et d'utilisation, font état d'une économie potentielle pouvant atteindre 52 % des coûts annuels d'électricité. Ces économies dépendent fortement de la dispersion des prix des tarifs d'électricité dynamiques, du profil de conduite individuel et du cadre réglementaire (par exemple, les frais applicables). En outre, la fourniture de services de réseau par le biais d'agrégateurs donne naissance à de nouveaux modèles commerciaux qui peuvent ouvrir des sources de revenus supplémentaires aux propriétaires de véhicules.

III.3.8.2. Obstacles à la mise en œuvre et défis

Malgré son énorme potentiel, la mise en œuvre à grande échelle du V2G se heurte à des obstacles importants d'ordre réglementaire, technique, économique et social.

III.3.8.3. Cadre réglementaire et juridique

Le cadre juridique en Allemagne et dans l'UE est en pleine évolution, mais reste lacunaire. L'un des principaux obstacles était la **double charge financière que représentaient les redevances de réseau, les taxes et les prélèvements** sur l'électricité stockée temporairement. L'électricité réinjectée était traitée comme de l'électricité destinée aux consommateurs finaux, ce qui rendait le V2G non rentable. Grâce à la révision de la loi sur l'économie énergétique (EnWG), en particulier l'article 14a, qui oblige les gestionnaires de réseaux de distribution à assurer la sécurité globale du réseau, à respecter des obligations de déclaration et à coopérer, notamment dans le contexte des exigences modernes telles que la mobilité électrique, le stockage d'électricité et les infrastructures communales, les systèmes de stockage mobiles seront exemptés des redevances de réseau pour la réinjection à partir de 2025, ce qui constitue une amélioration décisive (BNetzA, 2023).

Toutefois, il manque encore **des normes techniques et des protocoles de communication harmonisés** au niveau européen. La norme ISO 15118-20 mentionnée ci-dessus constitue certes une étape importante, mais sa mise en œuvre dans les véhicules et les infrastructures de recharge doit être généralisée. De même, **des questions fiscales** essentielles restent en

suspens, telles que le traitement des revenus provenant des services V2G. Cette incertitude freine le développement de modèles commerciaux.

Le règlement européen sur le déploiement d'une infrastructure pour les carburants alternatifs (AFIR) impose en effet à partir de 2027 **des capacités de communication bidirectionnelles** pour les nouvelles infrastructures de recharge publiques, ce qui constitue une impulsion importante. Cela ne signifie toutefois pas qu'il y ait une obligation d'avoir une fonctionnalité V2G, qui comprend également la capacité électronique de puissance pour la réinjection.

III.3.8.4. Défis infrastructurels et techniques

Le **déploiement laborieux des compteurs intelligents** en Allemagne constitue un frein infrastructurel majeur. Les systèmes de mesure intelligents sont indispensables pour la facturation des tarifs d'électricité dynamiques et le contrôle des processus de recharge en temps réel. La « loi sur la relance de la numérisation de la transition énergétique » vise à accélérer le déploiement, mais sa mise en œuvre reste un défi.

Le coût des boîtiers muraux bidirectionnels est actuellement encore nettement plus élevé que celui des modèles unidirectionnels (souvent d'un facteur 2 à 3), ce qui freine la propension des clients privés à investir. Avec l'augmentation de la production et la standardisation, on s'attend à une baisse des coûts.

Un point souvent discuté est **l'impact sur la durée de vie de la batterie**. La cyclisation supplémentaire due au V2G entraîne inévitablement une dégradation (vieillesse) accélérée de la batterie. Cependant, des études récentes montrent qu'avec une gestion intelligente de la batterie, qui maintient l'état de charge dans une plage optimale (par exemple 20-80 %) et limite le nombre de cycles par jour, la dégradation est modérée et les avantages économiques peuvent l'emporter sur les inconvénients (Zentralverband Deutsches Kraftfahrzeuggewerbe, 2023). Néanmoins, cette incertitude conduit à une **certaine réticence de la part de l'industrie automobile**, qui doit fournir des garanties sur la durée de vie des batteries.

III.3.8.5. Acceptation par le marché et nouveaux acteurs

Les **consommateurs** sont sceptiques. Le manque de clarté quant à la rentabilité, la complexité des modèles contractuels avec les agrégateurs et les inquiétudes concernant la durée de vie des batteries freinent l'acceptation. Des offres transparentes et faciles à comprendre sont ici une condition préalable fondamentale.

De plus, de nouveaux rôles doivent être établis sur le marché, en particulier celui des **agrégateurs**. Ceux-ci regroupent le potentiel de flexibilité de milliers de véhicules individuels pour former des centrales électriques virtuelles et les commercialisent sur les marchés de l'énergie. Leurs modèles commerciaux sont essentiels pour le développement du V2G (Solanke et al., 2020). Un autre aspect souvent négligé est la **cybersécurité**. La mise en

réseau de millions de véhicules avec le secteur critique des infrastructures du réseau électrique ouvre de nouveaux vecteurs d'attaque qui nécessitent des architectures de sécurité robustes.

III.3.8.6. Perspective internationale et perspectives d'avenir

Un coup d'œil à l'étranger montre que l'Allemagne a du retard à rattraper dans le domaine du V2G par rapport à des pays comme **la Grande-Bretagne, les Pays-Bas ou la France**. Dans ces pays, il existe déjà des offres commerciales V2G et un grand nombre de projets pilotes, qui s'accompagnent d'une réglementation proactive. L'Allemagne se limite encore largement à des projets pilotes et de recherche, comme ceux que l'on trouve dans **la région du Rhin supérieur**. La dimension transfrontalière est particulièrement importante dans ce contexte, car l'harmonisation des cadres réglementaires et techniques avec la France et la Suisse serait essentielle pour une utilisation intégrée et efficace du V2G dans la région.

Les évolutions juridiques mentionnées dans le texte initial sont des précurseurs essentiels. L'obligation de proposer **des tarifs d'électricité dynamiques** à partir de 2025 augmentera considérablement les incitations économiques en faveur de la recharge intelligente et du V2G. Les exigences de l'AFIR élargiront la base technologique de l'infrastructure de recharge.

III.3.8.7. Conclusion

L'analyse confirme que le Vehicle-to-Grid est une technologie clé au potentiel transformateur pour le système énergétique. Les potentiels mentionnés dans le texte initial en matière de réduction des coûts, de diminution des besoins de stockage et de meilleure intégration des énergies renouvelables sont largement confirmés par des études et des rapports scientifiques, même s'ils sont liés à des scénarios ambitieux. Le V2G est plus qu'une option technique ; il s'agit d'un élément constitutif de l'interconnexion des secteurs, qui peut favoriser de manière synergique la décarbonisation des secteurs des transports et de l'énergie.

Cependant, l'écart entre ce potentiel et la réalité actuelle en Allemagne est considérable. Les obstacles correctement identifiés dans le texte – incertitude réglementaire, déficits infrastructurels et acceptation hésitante du marché – freinent la mise à l'échelle.

Afin d'exploiter le potentiel du V2G, une action concertée des pouvoirs publics, de l'industrie et de la science est nécessaire. Les recommandations d'action suivantes peuvent être formulées :

- **Création d'une sécurité juridique et de planification** : les responsables politiques doivent rapidement supprimer les obstacles réglementaires restants. Cela inclut la clarification des questions fiscales et l'établissement de normes techniques claires et harmonisées à l'échelle européenne en matière de communication et de sécurité. Les récentes modifications apportées à la loi

allemande sur l'énergie (EnWG) constituent un pas dans la bonne direction, qui doit être suivi d'autres mesures.

- **Accélération du développement des infrastructures** : le déploiement de systèmes de mesure intelligents doit être poursuivi en priorité. Parallèlement, des incitations ciblées (par exemple via la KfW) devraient être mises en place pour l'achat de boîtiers muraux bidirectionnels afin de compenser les coûts supplémentaires initiaux et de stimuler un marché de masse.
- **Promotion de l'acceptation et des modèles commerciaux** : les consommateurs ont besoin d'informations transparentes sur les avantages et les risques du V2G, en particulier en ce qui concerne la durée de vie des batteries. Les constructeurs automobiles sont tenus de définir des conditions de garantie claires pour le fonctionnement du V2G. Le développement de modèles commerciaux innovants et conviviaux par les agrégateurs et les fournisseurs d'énergie doit être soutenu.
- **Renforcement de la recherche et de la coopération transfrontalière** : les projets pilotes, en particulier dans les régions frontalières telles que le Rhin supérieur, doivent continuer à être encouragés afin d'acquérir une expérience pratique et de tester et valider l'interopérabilité transfrontalière.
- Seule une approche proactive et coordonnée permettra d'intégrer de manière transparente des millions de véhicules électriques en tant qu'éléments actifs du système énergétique. Le V2G n'est plus une vision lointaine, mais une solution technologique concrète dont la mise en œuvre sera décisive pour rendre la transition énergétique rentable, sûre et durable.

III.4. Défis

La recherche sur la mobilité électrique a rencontré quelques obstacles. Le premier défi majeur était qu'il n'existe actuellement aucun système V2G applicable à grande échelle, de sorte que la combinaison de cette technologie avec des réseaux décentralisés de centrales de cogénération n'a pu être analysée que de manière prospective.

En outre, l'enregistrement et la dé QGIS nation hétérogènes des infrastructures de recharge au sein de l'UE et en Suisse se sont avérés problématiques. Les trois pays utilisent des systèmes différents pour enregistrer les infrastructures de recharge et publient également les données dans des formats très différents, ce qui complique considérablement la réédition de cartes et d'analyses transnationales. Les données allemandes, en particulier, ont dû faire l'objet d'un traitement approfondi, car les publications de l'Agence fédérale des réseaux regroupaient jusqu'à quatre points de recharge situés au même endroit dans une seule entrée. Afin de permettre une comparaison avec la France et la Suisse au niveau des points de

recharge, l'ensemble des données a dû être restructuré. De plus, les données sont publiées à des dates différentes³⁸. Ces constatations s'appliquent également à toutes les autres données gouvernementales utilisées, telles que le nombre de voitures particulières ou d'habitants des communes. Il a donc été nécessaire d'uniformiser et de traiter de manière approfondie les données pour la région du Rhin supérieur afin de constituer une base de données comparable. Mais ce qui est nettement plus problématique, c'est le fait que l'EVSEID³⁹ (Electric Vehicle Supply Equipment ID) prescrit par l'UE dans l'AFIR pour l'infrastructure de recharge n'est pas toujours utilisé (correctement) comme identifiant. Il n'apparaît pas du tout dans les ensembles de données allemands, les points de recharge étant identifiés par un identifiant distinct qui ne correspond pas à la norme. Les données françaises prévoient quant à elles cet EVSEID, mais celui-ci n'est pas toujours enregistré correctement, ce qui donne lieu à une nomenclature très hétérogène sans norme claire.

Le plus grand défi a été le manque d'uniformité des normes en matière de collecte et de traitement des données. Afin de permettre des analyses comparables à l'avenir, une norme commune devrait être établie.

Hormis ces défis liés au traitement des données, aucune difficulté notable n'a entraîné de déviation du projet.

III.5. Perspectives

Les recherches présentées ici donnent un aperçu de l'évolution actuelle de la mobilité durable dans la région du Rhin supérieur et des mesures prospectives nécessaires pour parvenir à une décarbonisation approfondie du secteur. Au cours du projet, les chercheurs ont identifié plusieurs domaines de recherche qui mériteraient d'être approfondis à l'avenir et pourraient faire l'objet de recherches supplémentaires. La mobilité électrique transfrontalière, en particulier, apparaît comme un domaine intéressant. L'infrastructure des deux côtés du Rhin a été étudiée, mais le comportement transfrontalier des habitants en matière d'utilisation, ou l'utilisation de facto de l'infrastructure au-delà des frontières, est également très intéressant. Le covoiturage transfrontalier en est un exemple notable, qui a été mis en évidence dans le cadre de l'analyse juridique, car il n'existe pas de réglementation uniforme pour un tel cas. L'étude des technologies Vehicle-to-Grid (V2G) présente un intérêt très élevé, en particulier à l'avenir, lorsque l'électrification du secteur de la mobilité progressera. Ce point de connexion au réseau devrait faire l'objet d'une étude plus approfondie. Le potentiel de stockage d'énergie disponible devrait être chiffré afin d'évaluer des cas d'application concrets et l'utilisabilité.

³⁸ Cf. publication avec Benoit

³⁹ Article 5 et annexe II du règlement (UE) 2023/1804 (AFIR)

III.6. Contribution à la feuille de route

La mobilité durable dans la région du Rhin supérieur est extrêmement importante pour la transformation de la région en une région innovante et neutre sur le plan climatique. La mobilité à faibles émissions permet non seulement de réduire les émissions de gaz à effet de serre et d'améliorer la qualité de l'air, mais elle contribue également à la mise en place d'un réseau énergétique plus résilient. Grâce à une gestion intelligente, les véhicules électriques peuvent contribuer à une meilleure utilisation des énergies renouvelables et, dans l'idéal, servir de réservoirs capables de réinjecter l'énergie stockée. Ils peuvent ainsi devenir un élément essentiel des réseaux intelligents décentralisés, qui dépendent de réservoirs tampons pour compenser les fluctuations.

Pour atteindre ces objectifs, plusieurs mesures importantes doivent toutefois encore être prises. Tout d'abord, davantage de véhicules électriques doivent remplacer les moteurs à combustion conventionnels afin de créer des capacités de stockage significatives et de réduire les émissions. Grâce à son développement rapide, l'infrastructure de recharge est actuellement si bien développée qu'elle permet de prendre en charge plus de véhicules qu'il n'y en a actuellement sur les routes. C'est pourquoi il convient de viser une part plus importante de véhicules électriques dans le parc automobile total. Cela ne signifie toutefois pas que le développement des infrastructures doit stagner, car le nombre de points de recharge doit également être constamment augmenté. En outre, il est également important de poursuivre la recherche sur les technologies Vehicle-to-Grid et de les rendre utilisables afin de permettre une utilisation de la mobilité électrique au service du réseau. En Europe, l'utilisation de ces technologies se limite généralement à des projets de recherche ou à des projets pilotes, mais elles doivent également être utilisées à plus grande échelle afin de pouvoir disposer des capacités de stockage nécessaires. Un système dans lequel les véhicules privés font partie de l'approvisionnement du réseau pose ses propres défis, non seulement sur le plan technique, mais aussi en termes de frais d'utilisation et de protection des données. Il faut également tenir compte du fait que le développement des énergies renouvelables, qui représentent une part croissante de l'approvisionnement énergétique, nécessite également la mise en place de systèmes de stockage d'énergie efficaces et rentables ou le développement de l'approvisionnement de base, en raison de leur volatilité et de leur dépendance aux conditions météorologiques. La France mise sur l'énergie nucléaire, tandis que l'Allemagne y a renoncé et est déjà confrontée à des périodes de faible ensoleillement et de faible vent (euronews, 2024)⁴⁰, (SMC, 2025)⁴¹. L'installation de nouvelles centrales à gaz comme *solution de secours*, actuellement envisagée, pourrait constituer une option à long terme.

⁴⁰ <https://www.euronews.com/business/2024/12/13/norway-aims-to-cut-energy-links-with-europe-due-to-soaring-prices>

⁴¹ <https://www.sciencemediacenter.de/angebote/dunkelflauten-wie-hohe-strompreise-gesenkt-werden-koennten-25009>

Cependant, celle-ci ne sera respectueuse du climat que si, comme dans le projet présenté ici, les centrales sont *compatibles avec l'hydrogène* (Staatsanzeiger, 2025)⁴².

Le concept de centrale de cogénération pourrait ainsi devenir un élément essentiel de l'approvisionnement énergétique en Europe et contribuer à la transformation, conjointement avec d'autres mesures de réduction des émissions, telles que la mobilité électrique dans le transport individuel et l'hydrogène dans le transport lourd.

⁴² <https://www.staatsanzeiger.de/nachrichten/wirtschaft/reiche-setzt-auf-neue-gaskraftwerke-im-sueden-deutschlands/>